

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Bc. Zdeněk Reder

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Optimalizace
řízeného spínání**

**Optimization of
Controlled
Switching Operation**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zdeněk Reder**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Optimalizace řízeného spínání**
Optimization of Controlled Switching Operation

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor spínání silových elektrických obvodů
3. Popište provoz řízeného spínání vypínačů v terciárech transformátorů PS
4. Proveďte analýzu s využitím teplotní kompenzace řízeného spínání v limitních podmínkách teplot
5. Popište využití zkušeností CIGRE (International Council on Large Electric Systems)
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Doporučená literatura:


- HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
- HAVELKA, Otto. Stavba elektrických přístrojů I., Brno, 1984, VUT Brno
- BULL, B.K.: Elektrické přístroje, SNTL Praha, 1978
- ITO, Hiroki: Switching equipment, Springer, NY, 2018, ISBN 978-3-319-72537-6
- SMEETS, R. P. P., VAN DER SLUIS L. et al: Switching in electrical transmission and distribution systems, John Wiley & Sons, UK, 2015, ISBN 978-1-118-38135-9
- Katalogy a latalogové listy
- Technické normy , Odborné a technické www stránky

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

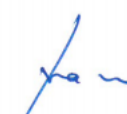
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

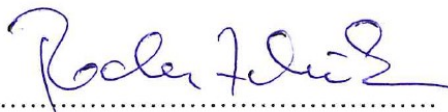



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Havířově dne 5. 5. 2020



Podpis autora

Abstrakt

Práce se zabývá teorií spínání čili zapínáním a vypínáním v neuzemněné soustavě. Zabývá se optimalizací řízeného spínání pomocí zařízení Switchsync PWC600. Dále řeší konkrétní výstupy ze zařízení Switchsync PWC600 jednotlivých spínání kompenzačních tlumivek v terciárech transformátorů a vyhodnocuje jejich jednotlivé průběhy. Dále je vyhodnocena Instalace teplotní kompenzace na základě snímání venkovní teploty a křivky teplotní kompenzace v zařízení SwitchSync včetně elektrických a mechanických parametrů vypínače. Ty jsou porovnány s parametry bez spínání s teplotní kompenzační křivkou. Tato práce dává rychlý a stručný přehled o technicky složitém zařízení tak, aby bylo přístupné pro provozní pracovníky a pro každého, kdo o toto téma projeví zájem.

Klíčová slova

Vypínač; Přechodové jevy; Řízené spínání; Spínání v izolované soustavě; Spínací operace; Operace zapnutí; Operace vypnutí; Optimalizace; Řízené spínání; Kompenzace; Kompenzační tlumivky; Monitorování vypínače; Elektrické funkce vypínače; Mechanické funkce vypínače; Teplotní kompenzace; Teplotní kompenzační křivka.

Abstract

This work's main focus is in switching theory, which is switching on and off in ungrounded systems. It is concerned with controlled switching optimization using Switchsync PWC600 controller. It also deals with Switchsync PWC600 outputs while measuring switching on characteristics of single reactors located in transformer's tercial windings. Furthermore, the installation of temperature compensation based on the sensing of the outdoor temperature and the temperature compensation curve in the Switch Sync device, including the electrical and mechanical parameters of the switch, is evaluated. These are compared with the parameters without switching with a temperature compensation curve. This work sums up this technically complicated device into quick and brief overview so it could be readily available for technicians or anyone who would express his interest in such matter.

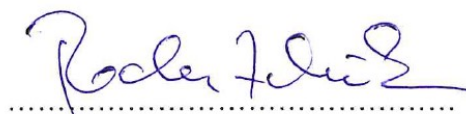
Keywords

Switch; Transient; Controlled switching; Switching in isolated system; Switching operation; Power-on operation; Shutdown operation; Optimization; Compensation; Shunt reactors; Switch monitoring; Electrical functions of a switch; Mechanical functions of a switch; Temperature compensation; Temperature compensation curve.

Poděkování:

Rád bych poděkoval Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování této diplomové práce. Mé poděkování patří také svému zaměstnavateli, který mi umožnil studium při zaměstnání a hlavně, který mi umožnil zpracovat tuto diplomovou práci na velmi zajímavé téma.

V Havířově dne 5. 5. 2020



Podpis autora

ČEPS a.s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10

Zástupce právnické osoby: Kateřina Jůdová

Prohlášení zástupce spolupracující právnické osoby:


„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských a magisterských studijních programech VŠB-TU Ostrava.“

Diplomová práce:

Optimalizace řízeného spínání

Autor práce: Bc. Zdeněk Reder

V Praze dne: 04.05.2020


Podpis:(25).....
ČEPS a.s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10
DIČ: CZ2570255

Obsah:

Seznam symbolů a zkratk.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	12
1 TEORETICKÝ ROZBOR SPÍNÁNÍ SILOVÝCH ELEKTRICKÝCH OBVODŮ	13
1.1 Vypínač.....	13
1.1.1 Zapnutá poloha.....	14
1.1.2 Vypnutá poloha.....	14
1.1.3 Zapínání	14
1.1.4 Vypínání.....	15
1.2 Spínání v izolované soustavě	15
1.2.1 Zapnutí	15
1.2.2 Vypnutí	16
1.3 Přechodové děje	17
1.3.1 Děje při zapínání	17
1.3.2 Děje při vypínání.....	17
1.4 Řízené spínání.....	20
2 PROVOZ ŘÍZENÉHO SPÍNÁNÍ V TERCÍÁRECH TRANSFORMÁTORŮ PS.....	21
2.1 Vypínače v terciárech transformátorů PS	22
2.1.1 Proces a princip spínání vypínače HPL72.5	23
2.2 Spínaná zátěž v terciárech transformátorů PS.....	24
2.3 Řízené spínání pomocí Switchsync PWC 600.....	26
2.4 Optimalizace řízeného spínání	27
2.4.1 Kompenzace parametrů.....	28
2.4.2 Adaptivní korekce	28
2.4.3 Operace zapnutí (Close operation).....	28
2.4.4 Operace vypnutí (Open operation).....	30
3 SPÍNÁNÍ KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY BEZ TEPLOTNÍ KOMPENZACE	33
3.1 Operace zapnutí tlumivky bez teplotní kompenzace	33
3.2 Zapnutí	33
3.2.1 Výstupy operace zapnutí.....	36
3.2.2 Výstupy operace zapnutí – zjištění	37
3.2.3 Operace zapnutí – další výstupy	39

3.3	Vypnutí	41
3.3.1	Výstupy operace vypnutí	43
3.3.2	Výstupy operace vypnutí – zjištění	44
3.3.3	Operace vypnutí – další výstupy	46
4	TEPLOTNÍ KOMPENZACE V LIMITNÍCH PODMÍNKÁCH TEPLOT	48
4.1	Teplotní kompenzace	48
4.1.1	Teplotní kompenzační křivka	48
4.2	Zapnutí	50
4.2.1	Zapnutí – Základní parametry	50
4.2.2	Zapnutí – porovnání základních parametrů	52
4.2.3	Zapnutí – odvozené parametry	53
4.2.4	Porovnání parametrů zapínání s kompenzační teplotní křivkou a bez ní	54
4.3	Vypnutí	55
4.3.1	Vypnutí – základní parametry	56
4.3.2	Vypnutí – porovnání základních parametrů	57
4.3.3	Vypnutí – odvozené parametry	59
5	DOPORUČENÍ A VÝSTUPY STUDIJNÍ SKUPINY A3 SIGRE	60
	Závěr	62
	Seznam použité literatury	64

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$L1, U$	označení první fáze
$L2, V$	označení druhé fáze
$L3, W$	označení třetí fáze
U_V	napětí výboje
I_V	proud výboje
u_0	napětí elektrického střídavého oblouku
i_0	proud elektrického střídavého oblouku
U_m	maximální hodnota napětí
u_a	napětí oblouku
U_{zn}, u_{zn}	zotavené napětí
i_U	proud ve fázi U
i_V	proud ve fázi V
i_W	proud ve fázi W
u_{pp}	průrazné poobloukové napětí
u_{kid}	ideální napětí na kontaktech
$U_{Kid\ max}$	maximální, ideální napětí na kontaktech
Z_U	Impedance ve fázi U
Z_V	Impedance ve fázi V
Z_W	Impedance ve fázi W
U_f	Fázové napětí
U_s	Sdružené napětí
GOOSE	„Generic Object Oriented Substation Event“ - Generická, objektově orientovaná událost rozvodny
IED	„Intelligent electronic device“ - Inteligentní elektronické zařízení
TA, TP	Přístrojový transformátor proudu
TV, TN	Přístrojový transformátor napětí
Deg	Označení úhlu
NO	Pomocný pracovní kontakt
NC	Pomocný klidový kontakt
ω	Úhlová frekvence
ω_{id}	Ideální úhlová frekvence
I, I_n	Jmenovitý proud
U_k	Napětí na kontaktu
i'	Ustálená složka proudu
i''	Přechodná složka proudu
QM	Vypínač
Q1	Odpojovač
RS	Reaktor
QE	Uzemňovač
TL	Kompenzační tlumivka
FV	Svodič přepětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Obvod v zapnuté poloze vypínače [1]	14
Obr. 2 - Obvod ve vypnuté poloze vypínače [1]	14
Obr. 3 - Schéma třífázové soustavy s neuzemněným izolovaným uzlem [1]	15
Obr. 4 - Fázorový diagram napětí třífázové neuzemněné sítě [1]	16
Obr. 5 - Výsledný časový průběh přechodného proudu [1]	17
Obr. 6 - Periodický průběh ideálního zotaveného napětí střídavého obvodu [1]	18
Obr. 7 - Průběh zotaveného napětí a průrazného poobloukového napětí při úspěšném vypnutí [1]	19
Obr. 8 - Závislost velikosti elektrické pevnosti a zotaveného napětí [1]	19
Obr. 9 - Schéma transformátoru 400/110/10,5kV s polem spínané kompenzační tlumivky 10,5kV	21
Obr. 10 - Vypínač HPL72.5 v terciáru transformátoru 400/110/10,5kV	22
Obr. 11 - Vnitřní uspořádání vypínače [2]	23
Obr. 12 - Vzduchová kompenzační tlumivka 10,5kV	25
Obr. 13 - Detail na konstrukci kompenzační tlumivky 10,5kV	25
Obr. 14 - Switchsync PWC600	27
Obr. 15 - Grafické znázornění ideálního průběhu operace zapnutí [4, 5]	29
Obr. 16 - Grafické znázornění ideálního průběhu operace vypnutí [4, 5]	31
Obr. 17 - Operace zapnutí – grafický výstup ze Switchsync	33
Obr. 18 - Detail operace zapnutí	35
Obr. 19 - Detail řízených zapínacích povelů	38
Obr. 20 - Grafický výstup vypnutí ze Switchsync	41
Obr. 21 - Detail operace vypnutí	42
Obr. 22 - Detail řízených vypínacích povelů	44
Obr. 23 - Teplotní kompenzační křivka vložená do Switchsync PWC600	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Základní parametry vypínače HPL 72.5B1	23
Tab. 2 - Základní parametry tlumivek 10,5kV	26
Tab. 3 - Legenda k obr. 15- ideální průběh operace zapnutí [4, 5]	29
Tab. 4 - Předdefinovaná strategie řízeného připojení kompenzační tlumivky [5]	30
Tab. 5 - Časy hoření oblouků při odpojení tlumivky od zdroje napětí [5]	31
Tab. 6 - Předdefinovaná strategie řízeného odpojení kompenzační tlumivky [5]	31
Tab. 7 - Význam jednotlivých částí z Obr. 17	34
Tab. 8 - Parametry operace zapnutí	36
Tab. 9 - Vypočtené časy jednotlivých mezikroků zapnutí	37
Tab. 10 – Parametry operací zapnutí -1/2	39
Tab. 11 - Dopočtené časové hodnoty k Tab. 10 – Parametry operací zapnutí -1/2	40
Tab. 12 - Parametry operací zapnutí -2/2	40
Tab. 13 - Dopočtené časové hodnoty k Tab. 12 - Parametry operací zapnutí -2/2	40
Tab. 14 - Význam jednotlivých částí z Obr. 20	41
Tab. 15 - Parametry operace vypnutí	43
Tab. 16 - Vypočtené časy jednotlivých mezikroků vypnutí	44
Tab. 17 - Parametry operací vypnutí 1/2	46
Tab. 18 - Dopočtené časové hodnoty k Tab. 17 - Parametry operací vypnutí 1/2	46
Tab. 19 - Parametry operací zapnutí - 2/2	47
Tab. 20 - Dopočtené časové hodnoty k Tab. 19 - Parametry operací zapnutí - 2/2	47
Tab. 21 - Závislost teploty okolí na časové odchylce mechanických spínacích časů z teplotní kompenzační křivky	49
Tab. 22 - Parametry sepnutí s využitím kompenzační křivky	50
Tab. 23 - Parametry sepnutí, bez využití kompenzační křivky	51
Tab. 24 - Porovnání základních parametrů s využitím kompenzační křivky a bez využití kompenzační křivky	52
Tab. 25 - Odvozené parametry k operaci zapnutí s využitím teplotní kompenzace	53
Tab. 26 - Odvozené parametry k operaci zapnutí bez využití teplotní kompenzace	54
Tab. 27 - Parametry vypínače s kompenzační teplotní křivkou a bez ní	54
Tab. 28 - Parametry vypnutí s využitím kompenzační křivky	56
Tab. 29 - Parametry vypnutí bez využití kompenzační křivky	57
Tab. 30 - Porovnání základních parametrů s teplotou okolí nad a pod +20 °C při operaci vypnutí	57

Tab. 31 - Odvozené parametry operace vypnutí nad +20 °C	59
Tab. 32 - Odvozené parametry operace vypnutí pod +20 °C	59

ÚVOD

Touto diplomovou prací volně navazuji na práci bakalářskou, ve které jsem řešil téma Optimalizované spínání. Vzhledem k předmětu a rozsahu tématu už při psaní bakalářské práce jsem si uvědomil, že spínání není optimalizované, ale řízené a my se jej snažíme pouze optimalizovat a svým způsobem idealizovat průběh spínání. Proto rozšiřuji název této diplomové práce na Optimalizace řízeného spínání.

Tato práce je zaměřena na řízené spínání kompenzační tlumivky v terciárech transformátorů 400/110/10,5kV v přenosové soustavě, kde je toto zařízení spínáno pomocí vypínače HPL72.5 se jmenovitou hodnotou napětí 72,5kV. Vypínač je zvolen tak, aby každý pól vypínače měl svůj jednopólový, nezávislý pohon sloužící k zapnutí a vypnutí. Hlavním důvodem je umístění transformátoru, vypínače a spínaného přístroje v izolované neuzemněné soustavě. Samotné řízené spínání a jeho optimalizace je prováděna a také zajištěna pomocí zařízení Switchsync PWC600.

Vypínače v terciárech transformátorů pro spínání kompenzačních tlumivek mají poměrně vysoký cyklus spínání (operace vypnutí a zapnutí) a pokud bychom nešli cestou řízeného spínání těchto vypínačů, docházelo by k většímu opotřebení mechanických částí vypínače, kontaktů k degradaci izolačních vlastností a dalších. Přechodové jevy by mohly nabývat větších hodnot a docházelo by k větším škodlivým účinkům. Tím by mohlo docházet ke špatné funkčnosti vypínače a s tím spojenou vyšší mírou nespolehlivosti. Řízeným spínáním ovšem nechráníme pouze vypínač jako takový, ale i spínané elektrické zařízení, v tomto případě kompenzační tlumivku nebo zdroj, kterým je transformátor. Jsou zde vyhodnoceny parametry spínání i s kompenzací parametrů mechanických či elektrických, kterými optimalizujeme řízené spínání. Dále je věnována kapitola optimalizaci, pomoci teplotní kompenzace a kompenzační křivky, která byla instalována na základě doporučení bakalářské práce.

Cílem této práce je určit, zda řízené spínání má smysl v této instalaci a zda teplotní kompenzace má vliv na optimalizaci zvláště mechanických parametrů jednotlivých sepnutí, případně porovnat parametry sepnutí vypínačů s teplotní kompenzací a bez ní.

1 TEORETICKÝ ROZBOR SPÍNÁNÍ SILOVÝCH ELEKTRICKÝCH OBVODŮ

Z hlediska spínání obvodů bereme v úvahu dvě změny stavu. V prvním případě jde o zapínání elektrického proudu a v druhém případě o vypínání elektrického proudu daného obvodu. Vypínání i zapínání elektrického obvodu je prováděno vypínačem, jehož parametry jsou voleny na základě skutečných parametrů obvodu a spínané zátěže. Při vypínání i zapínání elektrického proudu dochází v obvodu ke vzniku přechodových jevů. Přechodové jevy jsou důsledkem vzájemného působení mezi obvodem a vypínačem. [1, 4]

1.1 Vypínač

Základním úkolem vypínače, jako spínacího přístroje je uzavírat a přerušovat elektrický obvod, jehož trvalými stavy jsou poloha zapnutá a poloha vypnutá. Vlastním úkolem vypínače však není samotný přenos elektrického proudu, ale fyzické uskutečnění přechodu do obou poloh. Ze zapnuté polohy vypínače do polohy vypnuté a naopak. Tím charakterizujeme další dva stavy vypínače, které jsou přechodné a jde o zapínání a vypínání. Celkové provedení vypínače musí vždy respektovat oba trvalé i přechodné stavy. [1]

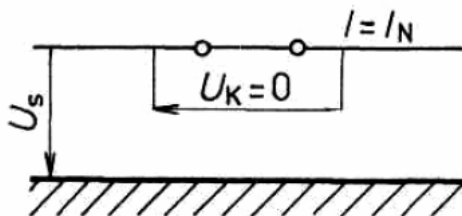
Celkové provedení vypínače můžeme obecně rozdělit a rozčlenit na základní konstrukční díly:

- Proudovodná část
- Izolace přístroje
- Mechanismus
- Zhášedlo
- Výzbroj [1]

V případě ideálního vypínače by se měl vypínač chovat jako ideální vodič v sepnutém stavu čili bez jakýchkoliv přechodových odporů a ve vypnutém stavu by choval jako ideální izolátor, to znamená, že by měl nekonečný odpor mezi kontakty. Jde ovšem pouze o teorii, kdy ve skutečném provozu vypínač vykazuje různé druhy namáhání, které mají vliv na jeho vlastnosti. Namáhání vypínače můžeme rozdělit na tři základní druhy. Prvním druhem je namáhání vypínače mechanické. Zde jde především o mechanické rázy při zrychlení a brždění mechanismu vypínače. Dalším je namáhání tepelné, které je způsobeno účinky oblouku, provozními a zkratovými proudy, nebo také vznikem vířivých proudů v ocelových dílcích v okolí vodičů. Třetím základním namáháním vypínače je namáhání elektrické. Elektrické namáhání vypínače je ovlivněno zotaveným napětím a celkově dielektrickými vlastnostmi vypínače. [1, 5]

1.1.1 Zapnutá poloha

Při zapnuté poloze vypínač definuje dokonalé propojení obvodu, jehož proudovodná část je pod jmenovitým napětím obvodu a je velmi dobře izolována od kostry vypínače. Kostra vypínače je uzemněna Obr. 1. [1]

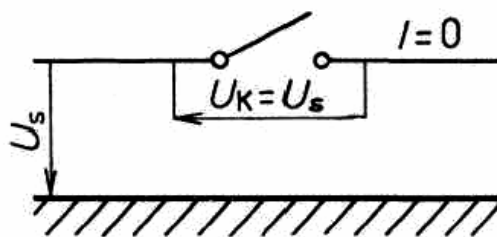


Obr. 1 Obvod v zapnuté poloze vypínače [1]

Při zapnuté poloze, prochází proudovodnými částmi vypínače jmenovitá hodnota proudu obvodu. Na základě průchodu proudu dochází ke vzniku tepelných ztrát a k oteplování kovových i izolačních částí vypínače. Velmi důležitou částí proudovodné dráhy jsou kontakty, ve kterých dochází k elektrickému styku dvou vodičů. Teplo nevzniká pouze přímými ztrátami, ale i dalšími vlivy, jakými jsou účinky oblouku, vířivé proudy, zkraty, přechodový odpor kontaktů a mnoho dalších. [1]

1.1.2 Vypnutá poloha

Při vypnuté poloze vypínače, definujeme spolehlivé přerušení vedení, kde proud mezi kontakty vypínače je nulový. Na kontaktech vypínače je soustředěno plné provozní napětí zdroje (Obr. 2), kdy izolační vzdálenost mezi kontakty, musí být dimenzována takovým způsobem, aby v žádném případě, za normálního stavu vedení, nemohlo dojít k přeskoku či průrazu prostředí mezi kontakty, nebo mezi částí vypínače pod napětím a částí vypínače s uzemněnou kosterou. [1]



Obr. 2 - Obvod ve vypnuté poloze vypínače [1]

1.1.3 Zapínání

Při zapínání vypínače se pomocí mechanismu uvede v pohyb mechanický kontakt přístroje. Uvedením v pohyb mechanického kontaktu dochází ke stálému zmenšování vzdálenosti mezi kontakty, kde mezi samotnými kontakty vzrůstá intenzita elektrického pole. V určité vzdálenosti

intenzita elektrického pole nabude takové velikosti, že nastane elektrický průraz prostředí a dojde k zapálení oblouku mezi kontakty ještě před jejich vzájemným stykem. [1]

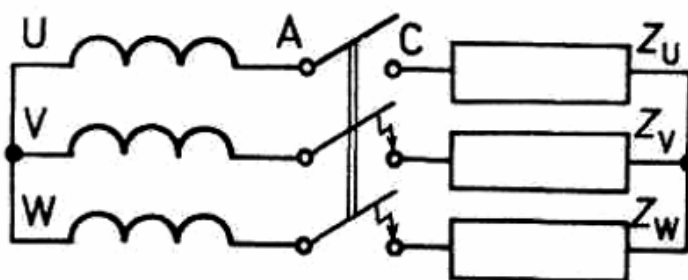
Jde tedy o přesun kontaktů z polohy vypnuté do polohy zapnuté, kde dojde k mechanickému styku obou kontaktů. K tomuto mechanickému styku kontaktů musí dojít v co nejkratším čase, kvůli tepelnému vlivu elektrického oblouku. Při delším působení oblouku by stykem kontaktů mohlo dojít k jejich svaření a znemožnění základní funkce vypínače. [1]

1.1.4 Vypínání

Při vypínání vypínače dochází k opačnému pochodu než při zapínání. Cílem je kontakty ve vzájemném styku, na nichž je napětí zdroje a jmenovitá hodnota proudu obvodu oddálit na takovou vzdálenost, při které se obnoví elektrická pevnost mezi kontakty a při které nebude hrozit opětovný průraz a zapálení oblouku [1].

Uvedení mechanismu z polohy zapnuto do polohy vypnuto u silnoproudých vypínačů je prováděno vybavovacím impulsem, kdy působením vypínacích pružin dojde k oddálení kontaktů. Při oddalování kontaktů jde přerušením proudu o násilnou změnu ustáleného energetického toku, jehož vlivem vzniká elektrický oblouk mezi kontakty. Oblouk způsobí, že proud mezi kontakty prochází i po oddálení kontaktů od sebe a jeho přerušení nastane až po uhasnutí oblouku a obnovení elektrické pevnosti mezi kontakty vypínače. Oblouk musí být uhašen v co nejkratším čase, vzhledem k jeho vysokým tepelným účinkům, které namáhají jak kontakty vypínače, tak celé jeho ústrojí. [1, 4]

1.2 Spínání v izolované soustavě



Obr. 3 - Schéma třífázové soustavy s neuzemněným izolovaným uzlem [1]

1.2.1 Zapnutí

V izolované soustavě za použití vypínače, jehož každý pól má svůj jednopólový, nezávislý pohon sloužící k zapnutí si musíme uvědomit princip operací zapnutí a vypnutí.

U operace zapnutí, sepnutím pouze jedné fáze, neuzavřeme proudový obvod a prakticky se vůbec nic nestane. Až sepnutím druhé fáze, docílíme uzavření proudové dráhy a působení sdruženého napětí. Následně je zapnuta třetí fáze. [1, 4]

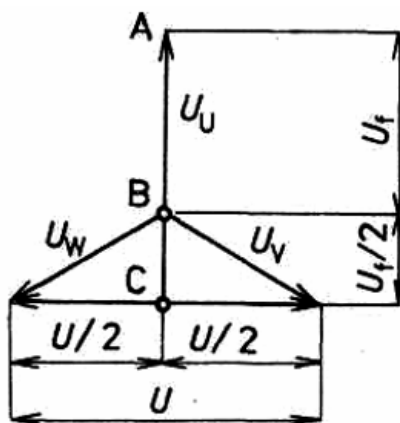
U řízeného spínání nedochází zvlášť k sepnutí první a druhé fáze. K sepnutí dochází najednou, a to v kladné hodnotě sdruženého napětí. Po sepnutí těchto dvou fází, je uzavřen proudový obvod se sdruženou hodnotou napětí, kdy napětí obou fází je posunuto o 90° . Proud je rozdělen na zapnuté dvě fáze a je roven celkovému proudu zátěže. 90° po sepnutí těchto dvou fází, dochází k sepnutí třetí fáze. Tímto sepnutím dostane nulový bod, nulový potenciál a dochází k rozdělení proudu mezi všechny fáze a napětí mezi fázemi je posunuto o 120° . Tím je zajištěn souměrný posun mezi fázemi a také podmínka uzavřené soustavy. [1, 4]

1.2.2 Vypnutí

Stejně jako u zapnutí, tak u vypnutí vypínačem, jehož každý pól má svůj jednopólový, nezávislý pohon je princip stejný, avšak reciproční. [4]

Před samotným vypnutím je obvod souměrný, kdy platí podmínka, že jednotlivé fáze jsou mezi sebou posunuty o 120° a také platí podmínka uzavřené soustavy. Splněním těchto podmínek víme, že nulový bod nabývá nulového potenciálu. Dle fázorového diagramu na Obr. 4, bude postup vypnutí následující.

V momentě, kdy vypneme, například fázi U a uhasne oblouk, vznikne pouze proudový obvod mezi fázemi V a W. V tomto proudovém obvodu působí sdružené napětí mezi fázemi a proud je mezi ně také rozdělen, tak aby součet proudů byl roven nule. Tímto je přesunut nulový bod z polohy B do polohy C a s tím je spojena změna rozdílu potenciálů. Výsledkem je, že obloukové napětí mezi kontakty fáze U, ve které oblouk uhasíná jako první, je 1,5násobkem fázového napětí. Fázový posun mezi fázemi V a W je vypnutím fáze U změněn ze 120° na 90° . Následně dojde k vypnutí fází V a W současně, protože jde o izolovanou soustavu. K vypnutí dojde 90° (5ms) po fázi U. [1, 4]



Obr. 4 - Fázorový diagram napětí třífázové neuzemněné sítě [1]

1.3 Přechodové děje

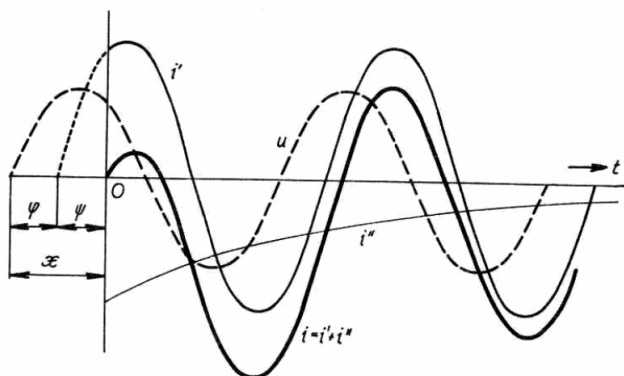
1.3.1 Děje při zapínání

Po spojení kontaktů vypínače dochází k připojení ke střídavému napětí a vzniká přechodný jev, kdy se mění proud z nulové velikosti v čase $t = 0$ až na hodnotu ustáleného proudu. Přechodovým jevem je právě ta část, kdy se proud z nulové velikosti při sepnutí obvodu musí dostat na hodnotu ustáleného proudu. Pak jde již o obvod v ustáleném stavu a přechodový jev pomine. Tento stav idealizujeme tím, že dojde k sepnutí kontaktů vypínače okamžitě bez prodlevy. Ve skutečnosti však spojení kontaktů jistou dobu trvá. [1]

Výsledným vztahem pro časový průběh proudu je:

$$i(t) = I_m \cdot [\sin(\omega t + \chi - \varphi) - \sin(\chi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (1)$$

Grafické znázornění:

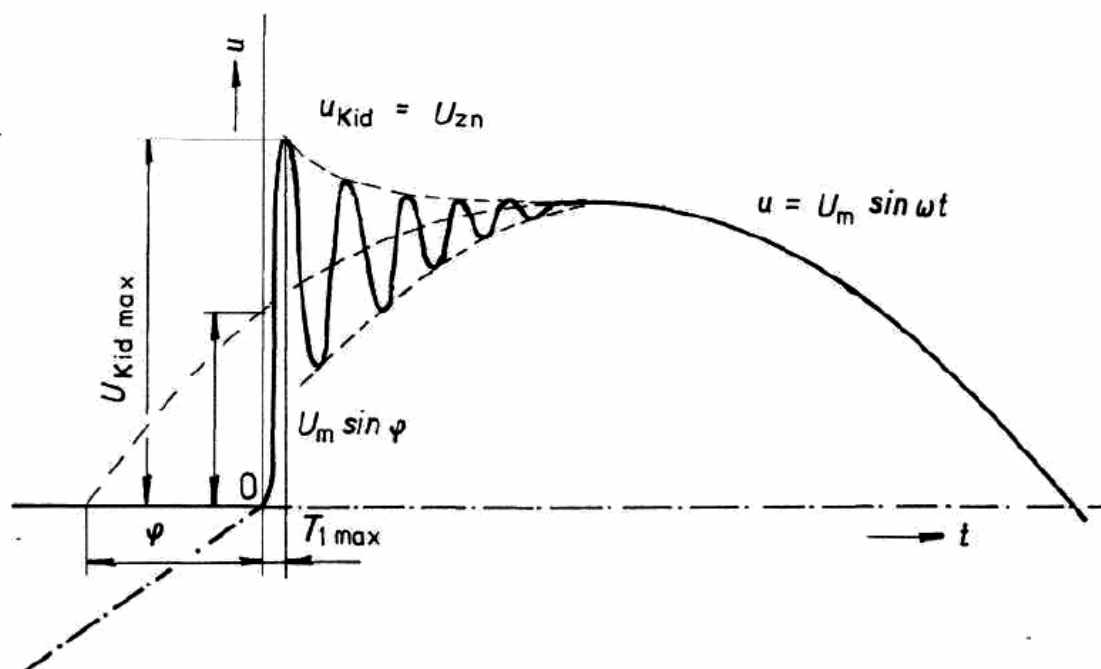


Obr. 5 - Výsledný časový průběh přechodného proudu [1]

Výsledným proudem je součet ustálené složky i' a přechodné složky i'' . Zásadním vlivem pro průběh přechodného proudu je počáteční okamžitá hodnota napětí zdroje, které je fázově posunuta o úhel φ v době $t = 0$, kdy vypínač spojí své kontakty a zapne. [1]

1.3.2 Děje při vypínání

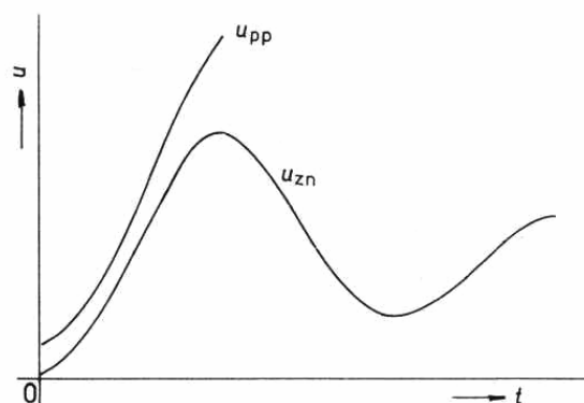
Při vypnutí vypínače dochází k oddálení kontaktů a natahování oblouku až do chvíle, kdy elektrická pevnost nabyde takové hodnoty, že oblouk uhasne. V rámci idealizace přechodového jevu uvažujeme, že odepnutí kontaktů proběhne okamžitě v čase $t = 0$. Napětí, které se objeví po odepnutí kontaktů je zotavené napětí u_{zn} . [1]



Obr. 6 - Periodický průběh ideálního zotaveného napětí střídavého obvodu [1]

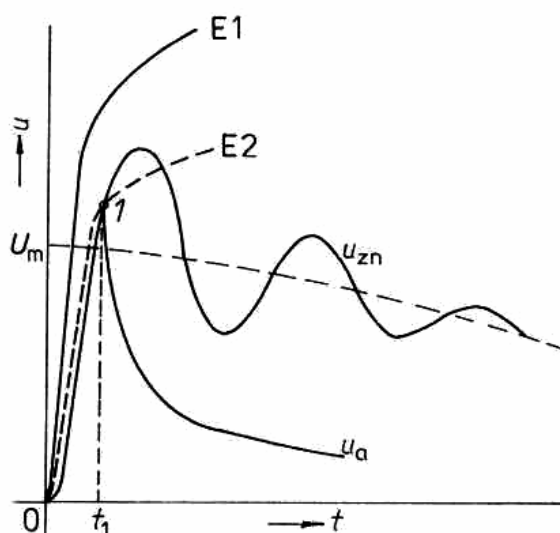
Zotavené napětí vzniká ihned po přerušení proudu mezi kontakty. Může dojít k překmitu hodnoty zotaveného napětí v řádech jednotek násobků jmenovité hodnoty napětí, kdy dochází k velkému namáhání vypínače, a i tento jev je jedním z důvodů, proč se dimenzují vypínače v terciárech transformátorů na vyšší napěťové hladiny.

Zotavené napětí je složeno ze dvou složek. První složkou je obnovené napětí u_{ob} , které je napětím zdroje a druhou složkou je poobloukové průrazné napětí u_{pp} . Obnovené napětí, charakterizuje úhlová frekvence ω a poobloukové průrazné napětí charakterizuje také harmonický průběh s úhlovou frekvencí ω_{id} , která je po určitém čase ztlumena. Kromě proudu je zotavené napětí hlavním parametrem k určení vypínací schopnosti vypínače. K vypnutí proudu je nutné, aby po zániku oblouku průrazné poobloukové napětí u_{pp} nabývalo větších hodnot než zotavené napětí u_{zn} . Průběh zotaveného napětí a průrazného poobloukového napětí při úspěšném vypnutí je na Obr. 7. Pokud by zotavené napětí u_{zn} bylo větší než průrazné poobloukové napětí u_{pp} dojde k průrazu prostředí a znovuzápalu oblouku, kvůli nedostatečné elektrické pevnosti mezi kontakty. [1, 4]



Obr. 7 - Průběh zotaveného napětí a průrazného poobloukového napětí při úspěšném vypnutí [1]

Dostatečná elektrická pevnost mezi kontakty je nutnou podmínkou při zhášení elektrického oblouku střídavého obvodu. Dostatečná elektrická pevnost je tehdy, jeli její růst větší, než růst hodnoty zotaveného napětí u_{zn} . Tato podmínka je zobrazena na Obr. 8. [1, 4]



Obr. 8 - Závislost velikosti elektrické pevnosti a zotaveného napětí [1]

Z Obr. 8 vyplývá, že časový průběh elektrické pevnosti ($E1$), musí nabývat větší velikosti, než je samotná velikost časového průběhu zotaveného napětí (u_{zn}), pro úspěšné uhasnutí elektrického oblouku. Nebude-li mít časový průběh elektrické pevnosti dostatečnou velikost ($E2$), dojde k selhání celého vypínacího procesu a k znovu vytvoření elektrického oblouku. Jako důsledek zaniklého zotaveného napětí, se objeví napětí oblouku na elektrodách vypínače (u_a). Nový oblouk hoří opět do dalšího průchodu proudu nulou a následně se celý proces opakuje, a to do doby, kdy převládnu deionizační procesy nad ionizačními a vzrůst elektrické pevnosti je dostatečný, například tak, jak tomu bylo v prvním případě s křivkou $E1$. [1, 4]

1.4 Řízené spínání

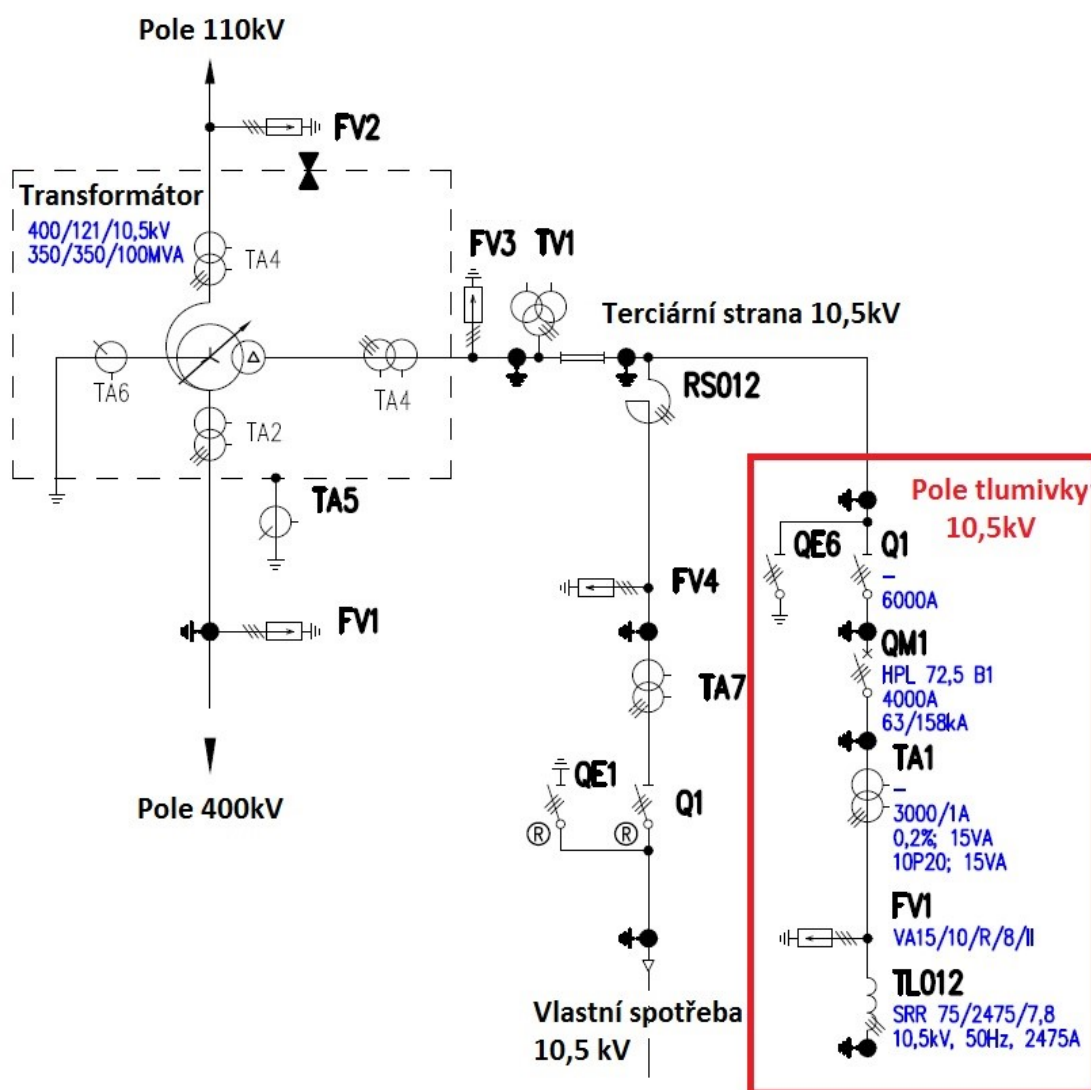
Smyslem řízeného spínání je přibližovat se ideálním okamžikům zapnutí či vypnutí zařízení. Jde o složitou operaci, kde musí být předdefinováno spoustu parametrů, jako například mechanický čas vypínače, reakce vypínače, čas impulsu, teplota okolí a mnoho dalších. Následně všechny tyto parametry vyhodnocuje zařízení, které má za úkol vyslat impuls k sepnutí zařízení tak, aby se blížilo nejlépe k ideálnímu okamžiku sepnutí. Toto zařízení před vysláním řízeného impulsu propočítává, vyhodnocuje a zkoumá výsledky předešlých sepnutí, čímž se snažíme optimalizovat toto řízené spínání.

Opravdu základním smyslem řízeného spínání je spínat vypínač tak, aby docházelo k menšímu opotřebování kontaktů, větší životnosti a spolehlivosti zařízení. Zařízení, jehož schopnostmi chceme dosáhnout co možná nejlepší okamžiky jednotlivých sepnutí, slouží k optimalizaci řízeného spínání.

Vzhledem k tomu, že charakter každého vypínače je specifický, musí být podroben detailnímu testování a diagnostice, kdy vyhodnocené parametry jsou následně vkládány do zařízení, které má ovládat a řídit samotné spínání. Bez těchto parametrů by bylo velmi obtížné, se vůbec přiblížit ideálním okamžikům.

2 PROVOZ ŘÍZENÉHO SPÍNÁNÍ V TERCÍÁRECH TRANSFORMÁTORŮ PS

V přenosové soustavě jsou v převážné míře využívány transformátory se jmenovitou hodnotou napětí 400/110/10,5kV. Primární strana transformátoru je připojena na určenou přípojnicí k přenosu elektrické energie ve stanici přenosové soustavy. Stejně tomu tak je na straně sekundární, která je připojena svým vlastním polem na jednu z přípojníc v elektrické stanici distribuční soustavy. Terciární strana těchto transformátorů je využívána k napájení vlastní spotřeby elektrické stanice a zároveň ke spínání kompenzačních tlumivky. Obě tyto využití jsou na terciární straně rozděleny svým polem, případně odbočkou. Více zřejmě to je z Obr. 9.



Obr. 9 - Schéma transformátoru 400/110/10,5kV s polem spínané kompenzační tlumivky 10,5kV

Pole spínané tlumivky je složeno z těchto prvků:

- Q1 – odpojovač
- QE6 – uzemňovač ze strany transformátoru
- QM1 – vypínač, který slouží k zapnutí samotné kompenzační tlumivky – 72,5kV, 4kA
- TA1 – přístrojový transformátor proudu s převodem 3000/1A
- FV1 – svodič přepětí
- TL012 – Kompenzační tlumivka 10,5kV, 7,8mH, 2475A

2.1 Vypínače v terciárech transformátorů PS

V terciárech transformátorů přenosové soustavy (400/110/10,5kV), jsou umístěny vypínače s hodnotou jmenovitého napětí 72,5kV. Tyto vypínače osazené na straně 10,5kV jsou takto dimenzovány hlavně z důvodu zotaveného napětí a snížení nežádoucích účinků, z toho souvisejícího menšího opotřebení komponent uvnitř vypínače, vznikem tepelných a dalších nežádoucích účinků elektrického oblouku. Těmito vypínači, dochází ke spínání terciární strany transformátoru a kompenzační tlumivky, kdy celý proces probíhá v izolované soustavě. Z tohoto důvodu je také základním požadavkem, aby každý pól vypínače měl svůj jednopólový, nezávislý pohon sloužící k zapnutí. Dalším důvodem je také řízené spínání a jeho optimalizace.



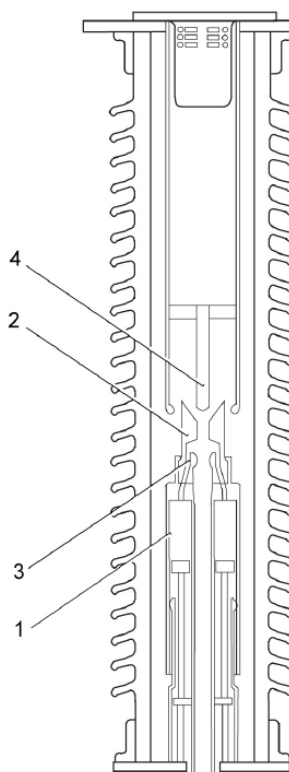
Obr. 10 - Vypínač HPL72.5 v terciáru transformátoru 400/110/10,5kV

Tab. 1 - Základní parametry vypínače HPL 72.5B1

Základní parametry vypínače:	
Typ	HPL 72.5B1
Jmenovité napětí	72,5kV
Jmenovitý proud	4000 A
Jmenovitý vypínaný proud	63kA
Jmenovitý zapínaný proud	15kA
Jmenovitý krátkodobý proud	63kA / 1s
Jmenovitá frekvence	50 H
Zhášecí médium	plyn SF ₆

2.1.1 Proces a princip spínání vypínače HPL72.5

Princip vypínače:



Obr. 11 - Vnitřní uspořádání vypínače [2]

1. Kompresní válec s výfukem (Puffer cylinder)
2. Tryska (Nozzle)
3. Pohyblivý opalovací kontakt (Moving arcing contact)
4. Pevný opalovací kontakt (Fixed arcing contact) [2]

Kompresní válec je v průběhu operace vypnutí tažen směrem k pevnému pístu (ke koncové poloze), stlačuje uzavřený objem plynu a tlačí ho vysokou rychlostí ven tryskou směrem k opalovacím kontaktům. [2]

Při oddalování kontaktu, dochází ke vzniku elektrického oblouku, který při vysokých proudech blokuje trysku. Jakmile se proud přiblíží aktuálnímu nulovému průchodu, začne plyn proudit ven z tlumicího válce. Speciálně navržená tryska zajišťuje, že proud plynu je veden směrem k oblouku. Plyn může projít pohyblivým opalovacím kontaktem, jakožto i kolem pevného opalovacího kontaktu. Po ochlazení oblouku, oblouk uhasne a proud se přeruší. [2]

Vypínač má oddělené hlavní kontakty pro přenos proudu, které se otevírají, před a uzavírají za opalovacími kontakty a nejsou při odpojování ovlivněny obloukem. Při zapínání se tlumicí válec posune nahoru, kontakty se spojí a kompresní válec se znovu naplní plynem.[2]

2.2 Spínaná zátěž v terciárech transformátorů PS

V terciárech transformátorů o jmenovité hodnotě 10,5kV se pro účel kompenzace využívají kompenzační tlumivky především suchého provedení Obr. 12. Jde o tři jednofázové tlumivky v izolované, neuzemněné soustavě, jejichž vinutí je zapojeno do hvězdy s neuzemněným uzlem. Jde o tlumivku vzduchovou bez feromagnetického obvodu. Tlumivka je složena ze samonosných cívek, které jsou navinuty do několika vrstev a jsou staženy bandážemi do hliníkové konstrukce ve tvaru hvězdice Obr. 13. [4]

Tlumivka je připojena pomocí lan AlFe na hliníkové trubkové a pásové vedení ke svodiči přepětí (FV1), dále k přístrojovému transformátoru proudu (TA1) a vypínači (QM). Pole tlumivky i s ostatními přístroji je znázorněno na Obr. 9.



Obr. 12 - Vzduchová kompenzační tlumivka 10,5kV



Obr. 13 - Detail na konstrukci kompenzační tlumivky 10,5kV

Z Tab. 2 jsou zřejmé základní parametry tlumivek. Zdánlivý výkon těchto tlumivek je 15MVA na jednotlivé fázi. Celkový zdánlivý výkon osazen v terciáru transformátoru tedy činí 45MVA. Jmenovitá indukce na fázi činí 7,8mH při jmenovitém proudu 2475 A.

Tab. 2 - Základní parametry tlumivek 10,5kV

Typ	SRR 75/2475/7,8
Výkon	45MVA
Výkon/fázi	15MVA
Jmenovitý proud	2475kA
Maximální trvalé napětí	12/ $\sqrt{3}$ kV
Jmenovité napětí	10,5/ $\sqrt{3}$ kV
Jmenovitá indukce/fázi	7,8mH
Typ chlazení	Vzduchové
Hmotnost	4450 kg

Tyto tlumivky na terciární straně transformátoru jsou na rozmezí přenosové a distribuční soustavy. Primární strana transformátoru 400kV je součástí soustavy přenosové, sekundární strana 110kV soustavy distribuční. Umístění tlumivky je tedy v místě technicky nejbližším k distribuční soustavě, a to proto, že jejich hlavní úlohou je kompenzace jalového kapacitního výkonu z distribuční soustavy.

Tlumivky jsou připojeny paralelně a jsou zdrojem induktivního jalového výkonu. Tím kompenzují nežádoucí, nadbytečný kapacitní jalový výkon a pomáhají zajistit stabilitu sítě. Jde tedy o skokové připojení a odpojení induktivní složky jalového výkonu kompenzační tlumivkou, čímž docílíme snížení kapacitního charakteru jalového výkonu v obvodu. [4]

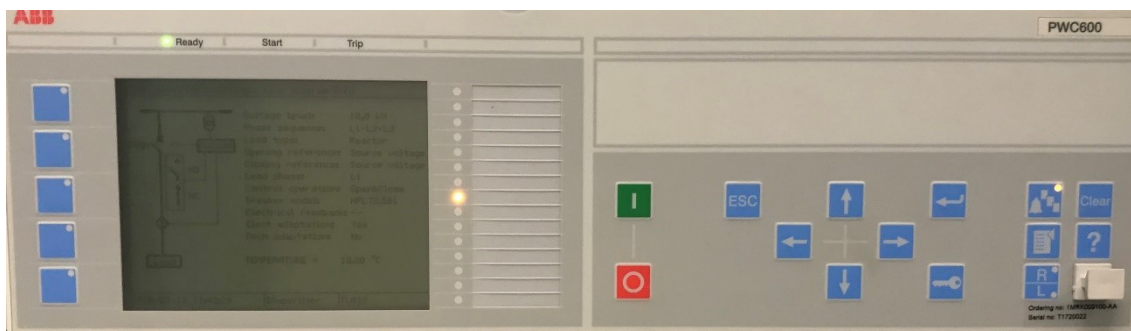
Kompenzace jalového výkonu z přenosové soustavy je prováděna kompenzačními tlumivkami se jmenovitou hladinou napětí 400kV připojené přímo do sítě nebo synchronními kompenzátory.

2.3 Řízené spínání pomocí Switchsync PWC 600

K řízenému plánovanému spínání je potřeba zařízení, pomocí kterého můžeme spínání řídit, jednotlivé spínání vyhodnotit a ideálně chceme, aby toto zařízení potřebovalo minimální množství zásahů, mimo pravidelné kontroly a údržby. Pro spínání kompenzačních tlumivek je určena jednotka Switchsync PWC 600 (Obr. 14).

Toto zařízení má zajistit a ovládat spínání takovým způsobem, aby k nárůstu proudu při zapínání a k přerušení proudu při vypínání docházelo ve vhodném fázovém úhlu, nejlépe však těsně před průchodem proudu zdroje nulou. To má zajistit minimalizaci nežádoucích, nebezpečných a škodlivých účinků, které mohou vzniknout při neplánovaném, neřízeném spínání. Obzvláště jde

o zamezení tepelných, mechanických a elektrických nežádoucích účinků spojených s přechodovými jevy a účinky elektrického oblouku. [4, 5]



Obr. 14 - Switchsync PWC600

Na řízené spínání má vliv mnoho faktorů. Zařízení musí mít nastavenou konfiguraci, typ, zapojení spínané zátěže a individuální kompenzační křivky. Dále může vyhodnotit například venkovní teplotu, tlak a jiné vlivy, které snímá pomocí senzorů nebo hodnot z řídicího systému. Vysláním impulsu k sepnutí musí tyto faktory brát v úvahu, a hlavně musí tento impuls poslat předem takovým způsobem, aby k sepnutí došlo opravdu v požadovaném a vhodném fázovém úhlu. Čas, o který musí tento impuls poslat dříve, je časovým součtem všech faktorů na cestě. Jde tedy o součet samotného impulsu, než dorazí, čas reakce zařízení, vypínače, čas mechanismu, který je ovlivněn venkovní teplotou a není konstantní a dalších. Parametry vypínače jsou specifické v každé své fázi a jsou zjišťovány diagnostikou přístroje, kdy naměřené hodnoty jsou vloženy do zařízení. Následně jsou vypočteny vhodné a optimální fázové úhly k sepnutí s ohledem na referenční napětí nebo proud. Zařízení posílá impuls na jednotlivé fáze a počítá jednotlivé vhodné okamžiky k jeho poslání. Následně zařízení vyhodnocuje předpokládané parametry sepnutí se skutečnými, zda se tyto hodnoty potkaly či nikoliv. Případné výchylky bere v potaz při dalším spínání a čas vyslání impulsu upravuje. [4]

2.4 Optimalizace řízeného spínání

Při řízeném spínání jsou nejvíce klíčové parametry samotného vypínače, které jsou rozdílné v každé fázi a které se mění dle provozních podmínek a vlivů okolí. Stárnutím vypínače se také mohou některé parametry, obzvláště parametry mechanické, lišit od parametrů či hodnot diagnostiky nového vypínače. Na základě vyhodnocení předchozích spínání, ať už zapnutí (Close operation) nebo vypnutí (Open operation) Switchsync PWC600, hlídá, kontroluje a upravuje spínání takovým způsobem, aby bylo vyhovující a aby bylo prováděno v optimálních fázových úhlech. K optimalizaci řízeného spínání, zařízení využívá dvě základní funkce. Jde o kompenzaci parametrů a adaptivní korekci. [4, 5]

2.4.1 Kompenzace parametrů

Switchsync PWC600 obsahuje předdefinované parametry spínaného obvodu a zařízení, kdy má pro zapnutí i vypnutí nastaveny kompenzační křivky daného typu vypínače. Funkce kompenzace parametrů vyhodnocuje a kompenzuje vliv externích a interních parametrů potřebných k optimalizaci na základě individuálních kompenzačních křivek sledovaných parametrů. Následně upravuje čas k vyslání impulsu. Sledovanými parametry jsou teplota, tlak v pohonu, doba nečinnosti vypínače, nastřádaná energie v pohonu, stejnosměrné ovládací napětí a další doplňkové veličiny, které uživatel nastaví. Individuální nastavené kompenzační křivky parametrů mohou být modifikovány či zablokovány. Po každé operaci sepnutí jsou kompenzační hodnoty aktualizovány a upraveny a jsou připraveny k vyhodnocení společně s adaptivní korekcí před dalším sepnutím. [4, 5]

2.4.2 Adaptivní korekce

Každou operaci sepnutí, Switchsync PWC600 provede analýzu řízeného okamžiku sepnutí z primárních analogových signálů a získá údaje a časy z binárních signálů, které jsou přivedeny z pomocných kontaktů vypínače. Analogovými signály jsou hodnoty proudu a napětí zátěže. Z binárních signálů získá skutečné časy spínání a následně porovnává s časy plánovanými. Z výsledné odchylky plánovaného a skutečného času sepnutí vznikne korekční hodnota. Pro další sepnutí se pomocí korekční hodnoty aktualizují provozní časy vypínače. Úkolem adaptivní korekce je tedy systematická změna provozních časových charakteristik použitého vypínače. [4, 5]

Následně dochází k celkové optimalizaci kombinací funkcí Adaptivní korekce a kompenzace parametrů a výpočtu ideálního okamžiku k sepnutí.

2.4.3 Operace zapnutí (Close operation)

Switchsync PWC600 pro připojení zátěže (tlumivky) ke zdroji musí sledovat a vyhodnocovat napětí zdroje. Napětí zdroje je referenčním signálem pro připojení zátěže a jeho hodnota je zajištěna z přístrojového transformátoru napětí (TV1) umístěného v terciáru transformátoru. Pro operaci zapnutí je nastaven sousledný sled fází, většinou s pevně zvolenou fází L1, která je spínána jako první. V jistých případech, může být zvolena pro první sepnutí „Random phase“, čili náhodná fáze, kdy Switchsync sám zvolí nejvhodnější fázi k sepnutí na základě jeho výpočtů. Součástí optimalizace je vypočten okamžik doteku mechanického kontaktu T_{tC} (close) pro každou fázi, dle následujícího vztahu [4, 5]:

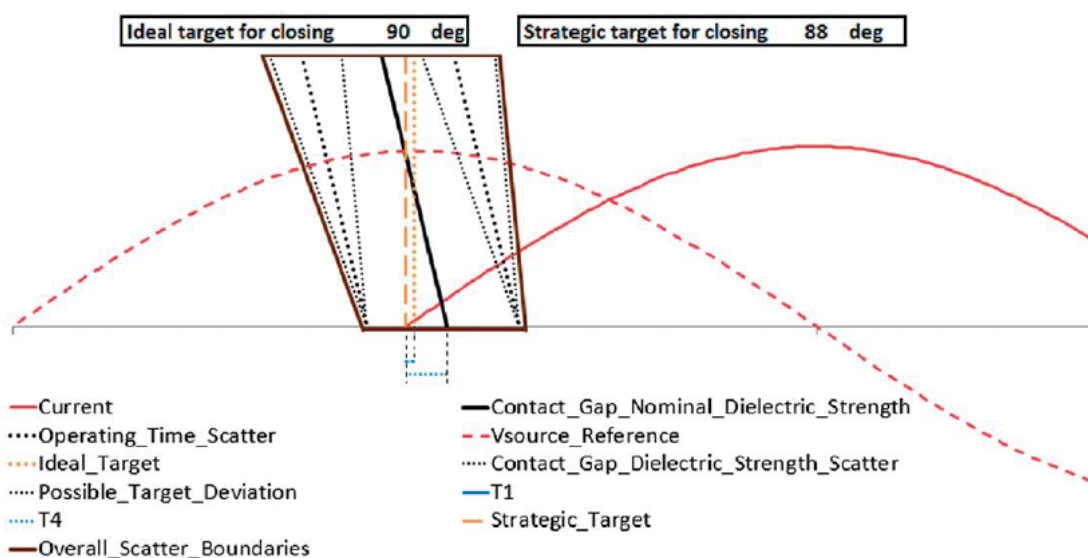
$$T_{tC} = T_0 + T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (2)$$

T_0 – ideální okamžik zapnutí

T_1 – odchylka od ideálního okamžiku, která zohledňuje dielektrický a mechanický rozptyl

- T_2 – celková kombinovaná korekční hodnota odvozená z kompenzačních parametrů
 T_3 – celková kombinovaná korekční hodnota elektrického a/nebo mechanického
 přizpůsobení
 T_4 – očekávaná doba před zapálením oblouku [4, 5]

Součtem těchto časů, Switchsync vypočte výsledný čas sepnutí pro jednotlivé fáze. Po provedení spínací operace opět začne proces funkcí kompenzace parametrů a adaptivní korekce. Princip ideálního zapnutí je graficky znázorněn na Obr. 15. Legenda je v Tab. 3.



Obr. 15 - Grafické znázornění ideálního průběhu operace zapnutí [4, 5]

Tab. 3 - Legenda k obr. 15- ideální průběh operace zapnutí [4, 5]

Ideal target for Closing	- Ideální okamžik pro zapnutí
Strategic target for closing	- Strategický okamžik pro zapnutí
Xx deg	- Xx stupňů
Current	- Proud
Operating_Time_Scatter	- Rozptyl provozního času
Possible_Target_Deviation	- Možné odchylky operace
Overall_Scatter_Boundaries	- Celkové hranice rozptylu
Contact_Gap_Nominal_Dielectric_Strenght	- Jmenovitá dielektrická pevnost kontaktní vzdálenosti
Contact_Gap_Dielectric_Strenght	- Dielektrická pevnost kontaktní vzdálenosti
Contact_Gap_Dielectric_Strenght_Scatter	- Rozptyl dielektrické pevnosti kontaktní vzdálenosti
Strategic_Target	- Strategie operace
Vsource reference	- Referenční napětí zdroje
Ideal target	- Ideální operace
Extended Arcing time due to adaptation	- Prodloužená doba hoření oblouku vyvolaná přizpůsobením (korekci)

U připojení tlumivky ke zdroji napětí, může dojít k nesymetrii fázových proudů vlivem nadměrného elektromagnetického namáhání. Je to další důvod, proč je vhodné připojovat kompenzační tlumivku jednotlivě po fázích a v maximu sinusového průběhu fázového napětí. Pro operaci zapnutí je přímo určena a předdefinována strategie řízeného připojení a je v Tab. 4.[4, 5]

Tab. 4 - Předdefinovaná strategie řízeného připojení kompenzační tlumivky [5]

Zapojení vinutí	Návrh jádra	Volba předstihové fáze	L1 (předst. fáze) - operace zapnutí	L2 - operace zapnutí	L3 - operace zapnutí
Y (hvězda / neuzemněný uzel) nebo Δ (trojúhelník)	Skupina	Náhodná volba	Kladný vrchol sdruženého napětí L1-L2		90° po předstihové fázi
	4/5 sloupce jádra				
	3 sloupce jádra	Pevná volba (L1)	Kladný vrchol sdruženého napětí L1-L2		90° po předstihové fázi

Předstihová fáze, za předpokladu, že je pevně nastavena na fázi L1, bude spínat první. Protože jde o sepnutí v izolované, neuzemněné síti, sepnutí fází L1 a L2 proběhne současně v kladném vrcholu sdruženého napětí, čímž se uzavře obvod a začne jím protékat proud. Fáze L3 bude zapnuta 90° po předstihové fázi L1. V tomto případě je taktéž ve fázi L3 zablokována adaptivní korekce časů pro operaci zapnutí.

Za předpokladu, že bude nastavená ke spínání náhodná volba k sepnutí první fáze, Switchsync sám zvolí nejvhodnější sepnutí, kdy současně sepnou 2 fáze (L1-L2, L2-L3, L3-L1) a 90° po sepnutí těchto dvou fází sepne fáze zbývající.

2.4.4 Operace vypnutí (Open operation)

Switchsync PWC600 pro odpojení zátěže (tlumivky) ke zdroji musí sledovat a vyhodnocovat protékající proud. Proud je referenčním signálem pro odpojení zátěže a jeho hodnota je zajištěna z přístrojového transformátoru proudu (TA1) umístěného mezi tlumivkou a vypínačem. Zde vždy platí nastavená předstihová fáze L1. V rámci optimalizace je vypočten okamžik oddělení mechanického kontaktu T_{t0} (open) pro každou fázi, dle následujícího vztahu [4, 5]:

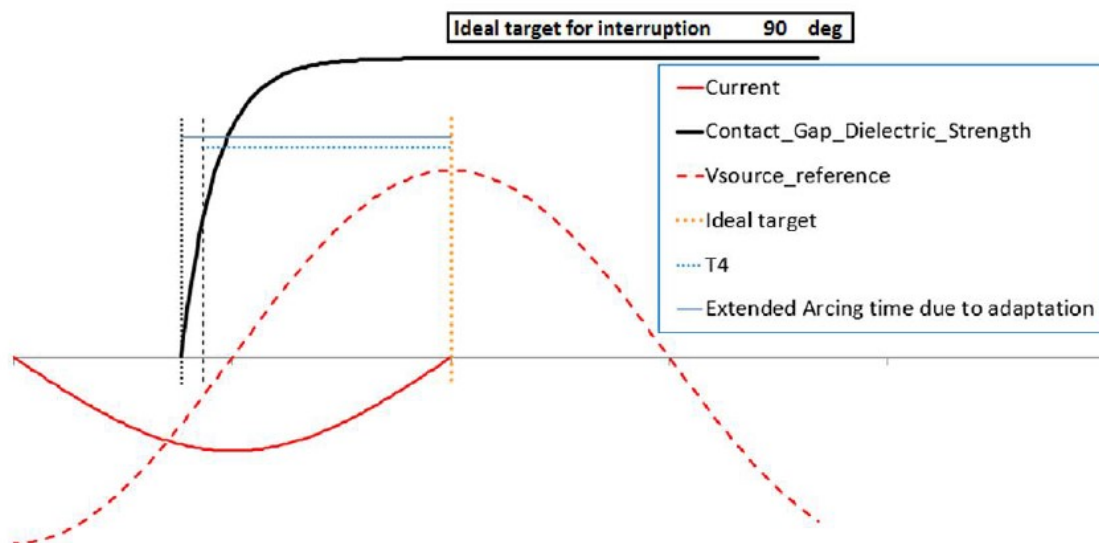
$$T_{t0} = T_0 - T_3 - T_4 \quad (5)$$

T_0 – ideální okamžik zapnutí

T_3 – celková kombinovaná korekční hodnota elektrického a/nebo mechanického přizpůsobení

T_4 – očekávaná doba před zapálením oblouku [4, 5]

Součtem těchto časů, Switchsync vypočte výsledný čas odpojení kontaktů v jednotlivých fázích. Taktéž jako u operace zapnutí, po úspěšné operaci vypnutí Switchsync vyhodnotí operaci funkcemi kompenzace parametrů a adaptivní korekce. Princip ideálního vypnutí je graficky znázorněn na Obr. 16. Legenda je v Tab. 3.



Obr. 16 - Grafické znázornění ideálního průběhu operace vypnutí [4, 5]

Při odpojení tlumivky od zdroje napětí dojde k velmi rychlému růstu hodnoty zotaveného napětí. Zotavené napětí je škodlivý přechodový jev, který za předpokladu nedostatečné dielektrické pevnosti mezi kontakty, může opětovně zapálit oblouk. Jediné východisko, jak minimalizovat tento nežádoucí jev je tedy vytvoření dostatečné dielektrické pevnosti mezi kontakty vypínače, a to v okamžiku přerušení proudu. To je zajištěno řízeným okamžikem mechanického oddělení kontaktů, kdy jsou nastaveny minimální a maximální časy hoření oblouků bez rizika opětovného zápalu. Minimální a maximální čili limitní hodnoty časů pro hoření oblouku jsou určeny a nastaveny před uvedením zařízení do provozu v rámci typových testů vypínače. Nastavení časů hoření oblouku pro jednotlivé fáze je určeno v Tab. 5.

Tab. 5 - Časy hoření oblouků při odpojení tlumivky od zdroje napětí [5]

Zapojení vinutí	L1 (předstihová fáze)	L2	L3
Y (hvězda / neuzemněný uzel) nebo Δ (trojúhelník)	$(1,5 \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$(0,87 \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$	$(0,87 \times T_{amin} + T_{amax}) / 2$

Pro operaci vypnutí kompenzační tlumivky je stejně jako u operace zapnutí předdefinována strategie řízeného odpojení a je v Tab. 6.

Tab. 6 - Předdefinovaná strategie řízeného odpojení kompenzační tlumivky [5]

Zapojení vinutí	Návrh jádra	Volba předstihové fáze	L1 (předst. fáze) - operace zapnutí	L2 - operace zapnutí	L3 - operace zapnutí
Y (hvězda / neuzemněný uzel) nebo Δ (trojúhelník)	Skupina 4/5 sloupce jádra	Pevná volba (L1)	Kladný průchod proudu fáze L1 nulovou hodnotou	90° po fázi L1	90° po fázi L1
	3 sloupce jádra				

Předstihová fáze je vždy pevně nastavena na fázi L1. Protože jde o odpojení v izolované, neuzemněné síti, proběhne odpojení fáze L1, při kladném průchodu proudu nulou a fáze L2 a L3 budou odpojeny od zdroje napětí 90° po odpojení fáze L1.

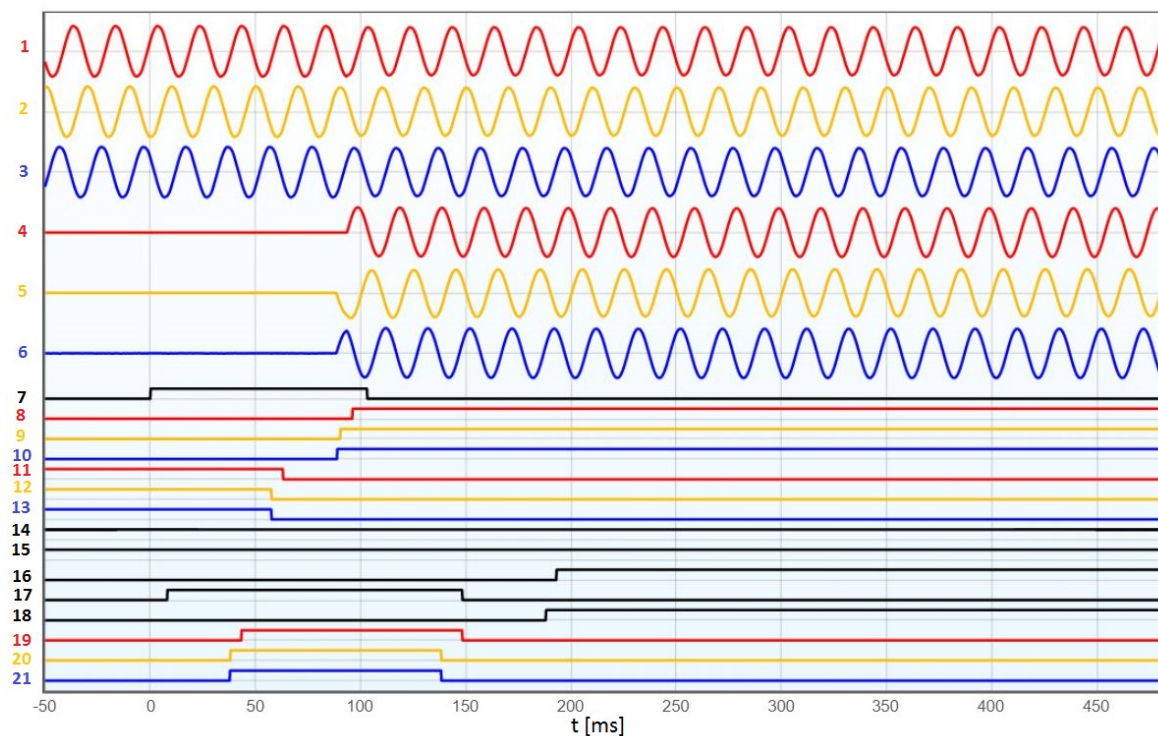
3 SPÍNÁNÍ KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY BEZ TEPLOTNÍ KOMPENZACE

Aby bylo možné zhodnotit případná pozitiva či negativa zařazení teplotní kompenzační křivky a vlastně kompenzaci mechanických časů na základě teplotní kompenzace, je potřeba prvně rozebrat průběhy spínání bez zakomponování teplotní kompenzační křivky.

3.1 Operace zapnutí tlumivky bez teplotní kompenzace

Teoretická část operace zapnutí a celý princip je již popsán v kapitole 2.4.3. Jednotlivé praktické principy, ukázky a časy budou blíže rozebrány v následujících částech této kapitoly.

3.2 Zapnutí

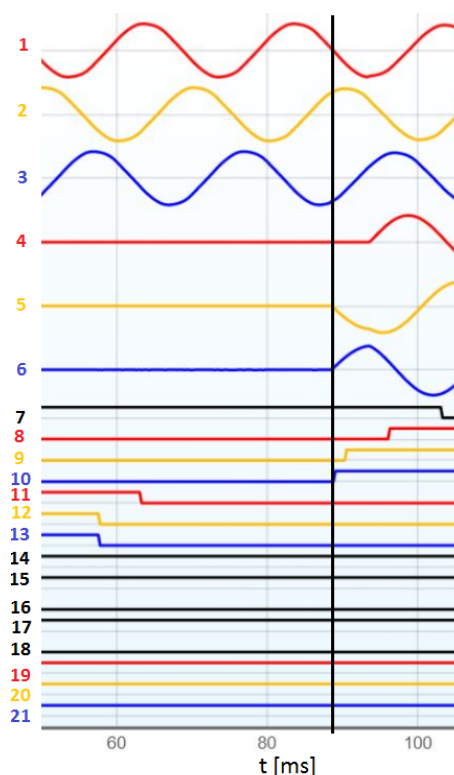


Obr. 17 - Operace zapnutí – grafický výstup ze Switchsync

Tab. 7 - Význam jednotlivých částí z Obr. 17

Pořadí	X	Označení	Min	Max	Význam
1.		U L1	-9kV	+9kV	Napětí fáze L1
2.		U L2	-9kV	+9kV	Napětí fáze L2
3.		U L3	-9kV	+9kV	Napětí fáze L3
4.		I L1	-3737 A	+3737 A	Proud fáze L1
5.		I L2	-3800 A	+3800 A	Proud fáze L2
6.		I L3	-3672 A	+3672 A	Proud fáze L3
7.		CloseCmdIn	---	---	Operace zapnutí
8.		NO-L1	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L1
9.		NO-L2	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L2
10.		NO-L3	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L3
11.		NC-L1	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L1
12.		NC-L2	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L2
13.		NC-L3	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L3
14.		1.01 OK	---	---	Stav zapínacího napětí
15.		1.11 OK	---	---	Stav vypínacího napětí
16.		Blockclose	---	---	Blokování zapínacího povelu
17.		StartPOW	---	---	Proces určení bodu na sinusové vlně signálu
18.		SpChCOBik	---	---	Úroveň natažení pružiny vypínače
19.		ClsCmdOutL1	---	---	Řízený zapínací povel vyslaný na vypínač fáze L1
20.		ClsCmdOutL1	---	---	Řízený zapínací povel vyslaný na vypínač fáze L2
21.		ClsCmdOutL1	---	---	Řízený zapínací povel vyslaný na vypínač fáze L3

Tab. 7 určuje jednotlivé části procesu zapnutí kompenzační tlumivky z Obr. 17. V bodech 1. – 3. je napětí zdroje. Napětí zdroje v případě zapínání, je referenčním signálem. V první řadě dojde k příkazu operace zapnutí kompenzační tlumivky ručně z řídicího systému dispečerem, případně obsluhou (bod 7. CloseCmdIn), a to v čase $t = 0$. Switchsync zhodnotí situaci, provede korekce a případné kompenzace parametrů, vezme v potaz všechny nastavené parametry a vyšle signály na jednotlivé fáze. V tomto sepnutí tedy na fáze L2 a L3 současně, následně fáze L1 (bod 19., 20., 21.)



Obr. 18 - Detail operace zapnutí

Protože jde o izolovanou soustavu, dojde k sepnutí fáze L2 a L3 současně. Po vyslání impulsu k zapnutí se uvedou v pohyb pomocné klidové kontakty taktéž současně (bod 12. a 13.). Následně je uveden v pohyb pomocný klidový kontakt fáze L1, k jejímuž sepnutí v ideálním případě dojde 90° po sepnutí fází L2 a L3. V bodech 9 a 10 dochází k sepnutí pomocného pracovního kontaktu fází L2 a L3, čímž se uzavře elektrický obvod a začne jím protékat proud. Poté dojde k sepnutí pomocného pracovního kontaktu fáze L1, čímž se fázový posun rozdělí na 120° elektrických mezi fázemi a zapnutí jako takové je u konce.

Protože se spíná fáze L2 a L3, nikoliv fáze L1 společně s další fází, je patrné a zřejmé, že v nastavení Switchsync pro operaci zapnutí není pevně nastavena volba předstihové fáze na fázi L1, ale je zde využita funkce „náhodná volba“ a Switchsync sám výpočtem vybere, vhodnou kombinaci k sepnutí (L1-L2, L2-L3, L3-L1). Následně připojí zbývající fázi.

3.2.1 Výstupy operace zapnutí

Výstupy z této operace jsou uvedeny v Tab. 8. V tabulce můžeme vidět parametry, které Switchsync předpokládal svým odhadem či výpočtem a následné skutečné časy dané operace.

Tab. 8 - Parametry operace zapnutí

Datum	Datum		29.03.2020 22:08		
Close operation	OP. Zapnutí	-	L1	L2	L3
Electrical target error	Elektrická chyba operace	ms	0,00	-0,05	0,08
Electrical operating time	Elektrický provozní čas	ms	50,29	50,54	50,93
Predicted electrical operating time	Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	50,29	50,59	50,85
Current making angle	Aktuální úhel zapínacího proudu	deg	269,9	58,99	301,4
Target current making angle	Cílový úhel zapínacího proudu	deg	269,88	59,89	299,89
Mechanical target error	Mechanická chyba operace	ms	-0,19	-1,31	-3,04
Mechanical operating time	Mechanický provozní čas	ms	50,18	49,38	47,89
Predicted mechanical operating time	Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	50,37	50,68	50,93
Initial mechanical delay time	Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	19,66	19,37	19,74
Mechanical moving time	Mechanický čas pohybu	ms	33,11	32,82	31,28
Controller delay time	Časové zpoždění	ms	43,3	43,3	43,3
Idle time	Doba nečinnosti	h	15,29	15,29	15,29
DC control voltage	DC řídicí napětí	V	220	220	220
Operation count	Počet operací		282	282	282
Cumulated interrupter wear	Kumulované opotřebení přerušovače		282	282	282

- **Elektrická chyba operace**

Jde o rozdíl mezi předpokládaným elektrickým provozním časem a skutečným elektrickým provozním časem. Elektrická chyba operace uvádí, v jaké míře se splnil předpoklad. Ve fázi L1, byl předpoklad splněn s nulovou hodnotou. Ve fázi L2 byl elektrický provozní čas o 0,05ms rychlejší, než byl její předpoklad. U fáze L3 naopak byl o 0,08ms pomalejší. Elektrická chyba u této operace je vzhledem k jejím hodnotám velmi přesná.

- **Aktuální úhel zapínacího proudu**

Jde o skutečný úhel sepnutí proudu v jednotlivých fázích

- **Cílový úhel zapínacího proudu**

Předpoklad fázových úhlů k sepnutí pro jednotlivé fáze. Rozdílem cílového (plánovaného) a aktuálního (skutečného) úhlu zapínacího proudu zjistíme chybu úhlu operace.

- **Mechanická chyba operace**
Jde o rozdíl mezi předpokládaným mechanickým provozním časem a skutečným mechanickým provozním časem. Mechanická chyba operace uvádí, v jaké míře se splnil předpoklad. Mechanismus ve fázi L1, byl o 0,18ms rychlejší než jeho předpoklad. Ve fázi L2 byl rychlejší o 1,31ms a ve fázi L3 byl mechanismus vypínače taktéž rychlejší, a to o 3,04ms. Celkově můžeme říci, že rychlost a reakce mechanismu vypínače při vykonání této operace byla rychlejší, než výpočty zařízení Switchsync předpokládaly.
- **Počáteční mechanický čas zpoždění**
Jde o dobu od povelu (zapnutí vypínače) k rozpojení klidového kontaktu (NC). [4]
- **Mechanický čas pohybu**
Jde o dobu od rozpojení klidového kontaktu (NC) k sepnutí pracovního kontaktu vypínače (NO). [5]
- **Časové zpoždění**
Jde o dobu od pokynu dispečera k zapnutí vypínače ($t = 0$), k vyslání řízeného zapínacího povelu na jednotlivé fáze vypínače. Během této doby Switchsync navrhuje a počítá nejvhodnější způsob sepnutí dané operace.
- **Doba nečinnosti**
Doba od posledního vypnutí vypínače.

3.2.2 Výstupy operace zapnutí – zjištění

K lepšímu přehledu a pochopení operace zapnutí daného vypínače jsem vypočetl časy jednotlivých mezikroků, které jsou nedílnou součástí této operace. Tyto mezikroky a jejich časy jsou uvedeny v Tab. 9.

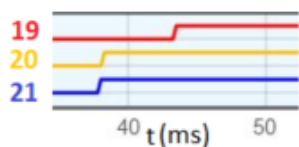
Tab. 9 - Vypočtené časy jednotlivých mezikroků zapnutí

Datum		29.03.2020 22:08		
Close operation	-	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	43,30	38,30	38,10
Rozpojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	62,96	57,67	57,84
Připojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	96,07	90,49	89,12
Rozdíl mezi sepnutím NC a počátkem průchodu proudu	ms	2,48	1,46	0,09
Počátek průchodu proudu	ms	93,59	89,03	89,03
Rozdíl mezi sepnutím fází	ms	4,56	-	-

Protože jde o operaci zapnutí, kdy není pevně nastavena předstihová fáze L1, ale náhodná volba, každé sepnutí může být voleno ze sepnutí prvních dvou fází rozdílně, avšak vždy v sousledném tvaru (L1-L2, L2-L3, L3-L1). Hodnoty v Tab. 8 uvádějí, že časové zpoždění jednotlivých fází bude stejné, a to 43,3ms. Pozorováním chování zařízení Switchsync a mechanismů vypínače je možno odvodit skutečné časové zpoždění jednotlivých fází vypínače.

3.2.2.1 Skutečné časové zpoždění

Zvolením předstihové fáze přes náhodnou volbu je současně připojena fáze v sousledném směru. V tomto případě k vybrané předstihové fázi L2 bude současně sepnuta fáze L3 a následně 90 ° poté fáze L1, čímž uzavřeme celkový elektrický obvod.



Obr. 19 - Detail řízených zapínacích povelů

Z Obr. 19 je patrné, že k řízeným zapínacím povelům nedošlo shodně v čase 43,3ms. Byť je předstihovou fází nastavena fáze L2, Switchsync určuje průběh operace stále pro fázi L1. Není-li součástí prvního uzavření obvodu (L1-L2 nebo L3-L1), je uvedený čas 43,3ms pouze pro fázi L1. Protože je čas nastaven pouze pro fázi L1, je nutné sepnout fáze L2 a L3 dříve, a to 90 ° před samotnou L1. To znamená, že tyto fáze musí sepnout o 5ms

dříve. Dalším sledováním mechanismu vypínače bylo zjištěno, že fáze L3 (případně L2, pokud jde o spínání L1-L2), je posunuto ještě o -0,2ms. Z toho plynou skutečná časová zpoždění nebo také skutečný čas vyslání řízených zapínacích povelů k vypínači. Byť tedy Switchsync uvádí shodně čas zpoždění 43,3ms, jejich skutečné časové zpoždění je: L1 – 43,3ms, L2 – 38,3ms a L3 – 38,1ms.

3.2.2.2 Rozpojení pomocného klidového kontaktu (NC)

Vlivem vyslání řízených zapínacích povelů musí dojít v první řadě k rozpojení klidového kontaktu (NC) a připojení pracovního kontaktu (NO).

Součet časů skutečného časového zpoždění z Tab. 9 a času počátečního mechanického zpoždění z Tab. 8 udává čas rozpojení pomocného klidového kontaktu. Tento skutečný čas rozpojení klidového kontaktu je uveden v Tab. 9 a je pro L1 – 62,96ms, L2 – 57,67ms a pro L3 – 57,84ms.

3.2.2.3 Sepnutí pomocného pracovního kontaktu (NO)

Po rozpojení klidového kontaktu (NC) dochází k mechanickému pohybu kontaktů. Součtem mechanického času pohybu z Tab. 8 a skutečného času rozpojení klidového kontaktu jsme schopni určit skutečný čas sepnutí pomocného pracovního kontaktu (NO). Ten je taktéž uveden v Tab. 9 a jeho časové hodnoty jsou pro L1 – 96,07ms, L2 – 90,49ms a pro L3 – 89,12ms.

3.2.2.4 Počátek průchodu proudu

Mohli bychom říci, že časem sepnutí pomocného pracovního kontaktu dojde k uzavření obvodu minimálně ve fázi L2 a L3, následně 5ms po nich ve fázi L1. Počátek průchodu proudu dle grafického zobrazení ovšem napovídá tomu, že k počátku průchodu proudu dochází dříve než k samotnému sepnutí všech pomocných pracovních kontaktů.

Ve fázi L3 dochází k sepnutí pomocného pracovního kontaktu v čase 89,12ms. Souběžně dochází k mechanickému pohybu k pomocnému pracovnímu kontaktu ve fázi L2 a ke snižování vzdálenosti mezi kontakty. Zmenšováním vzdálenosti vzrůstá intenzita elektrického pole mezi kontakty do té doby, než nastane elektrický průraz a zapálení oblouku. K tomuto elektrickému průrazu ve fázi L2 dochází v čase 89,03ms a zároveň dochází k počátku průchodu proudu ve

fázích L2 a L3. K samotnému sepnutí pracovního kontaktu fáze L2 dochází 1,46ms poté, co nastane elektrický průraz a vznik elektrického oblouku mezi kontakty.

Fáze L1 je na tom obdobně. Elektrický průraz mezi kontakty nastane v čase 93,59ms, čímž se uzavře proud obvodu. V čase 96,07ms dochází k sepnutí pracovního kontaktu. K sepnutí pracovního kontaktu tedy došlo po 2,48ms. Všechny časové hodnoty uvedené výše jsou uvedeny v Tab. 9.

Z výsledných časů počátků průchodů proudů můžeme říci, že k připojení fáze L1 došlo 4,56ms po připojení fází L2 a L3.

3.2.3 Operace zapnutí – další výstupy

V tabulkách níže jsou uvedeny hodnoty a parametry deseti operací zapnutí. Vzhledem k nastavení náhodné předstihové fáze jsou žlutě vyznačeny spínané fáze, které byly použity pro uzavření obvodu jako první. Následně jsou vypočteny skutečné časy počátků průchodů nulou a další. Stejně tak, jak je uvedeno v kapitole 3.2.2 jsou zde uvedeny všechny tři kombinace volby předstihové fáze.

Tab. 10 – Parametry operací zapnutí -1/2

Datum		17.03.2020 22:00			19.03.2020 1:06			22.03.2020 1:19			24.03.2020 0:16			24.03.2020 23:37		
OP. Zapnutí	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Elektrická chyba operace	ms	-0,03	-0,06	0,05	0,00	-0,02	-0,02	0,12	0,11	0,09	0,26	0,19	0,23	0,08	-0,14	0,08
Elektrický provozní čas	ms	50,24	50,60	50,90	50,20	50,51	50,80	50,35	50,65	50,93	50,45	50,72	51,05	50,32	50,44	50,94
Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	50,27	50,66	50,85	50,19	50,53	50,82	50,23	50,54	50,83	50,19	50,53	50,82	50,24	50,58	50,85
Aktuální úhel zapínacího proudu	deg	269,35	58,75	300,78	59,96	299,46	269,52	301,98	271,82	61,58	64,48	303,35	274,06	301,38	267,36	61,42
Cílový úhel zapínacího proudu	deg	269,88	59,89	299,89	59,89	299,89	269,88	299,89	269,88	59,89	59,89	299,89	269,88	299,89	269,88	59,89
Mechanická chyba operace	ms	-0,38	-0,24	-2,24	0,26	-1,39	-1,47	-0,44	0,09	-2,1	-0,76	-1,17	-1,06	-1	-0,82	-1
Mechanický provozní čas	ms	49,97	50,5	48,71	50,54	49,24	49,43	49,88	50,73	48,81	49,52	49,46	49,84	49,34	49,84	49,93
Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	50,35	50,74	50,95	50,27	50,63	50,9	50,31	50,64	50,92	50,28	50,62	50,9	50,34	50,66	50,94
Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	19,76	19,17	19,68	19,68	19,19	19,76	19,72	19,29	19,65	19,55	19,33	19,75	19,58	19,31	19,71
Mechanický čas pohybu	ms	32,78	34,26	32,26	33,48	32,85	32,97	32,72	34,38	32,4	32,51	32,95	33,43	32,29	33,38	33,58
Časové zpoždění	ms	40,26	40,26	40,26	44,07	44,07	44,07	43,58	43,58	43,58	44,03	44,03	44,03	37,85	37,85	37,85
Doba nečinnosti	h	15,67	15,67	15,67	18,73	18,73	18,73	67,44	67,44	67,44	18,86	18,86	18,86	17,36	17,36	17,36
DC řídící napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Počet operací		273	273	273	274	274	274	275	275	275	276	276	276	277	277	277
Kumulované opotřebení přerušovače		273	273	273	274	274	274	275	275	275	276	276	276	277	277	277

Tab. 11 - Dopočetné časové hodnoty k Tab. 10 – Parametry operací zapnutí -1/2

Datum		17.03.2020 22:00			19.03.2020 1:06			22.03.2020 1:19			24.03.2020 0:16			24.03.2020 23:37		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	40,26	35,26	35,06	44,07	43,87	49,07	43,58	48,58	43,38	44,03	49,03	43,83	37,85	42,85	37,65
Rozpojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	60,02	54,43	54,74	63,75	63,06	68,83	63,3	67,87	63,03	63,58	68,36	63,58	57,43	62,16	57,36
Připojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	92,8	88,69	87	97,23	95,91	101,8	96,02	102,25	95,43	96,09	101,31	97,01	89,72	95,54	90,94
Rozdíl mezi sepnutím NC a počátkem průchodu proudu	ms	2,3	2,73	1,04	2,85	1,53	1,93	1,71	3,02	1,12	-3,66	1,56	2,13	1,13	2,25	2,35
Počátek průchodu proudu	ms	90,5	85,96	85,96	94,38	94,38	99,87	94,31	99,23	94,31	99,75	99,75	94,88	88,59	93,29	88,59
Rozdíl mezi sepnutím fází	ms	4,54	-	-	-	-	5,49	-	4,92	-	-	4,87	-	-	4,7	-

Tab. 12 - Parametry operací zapnutí -2/2

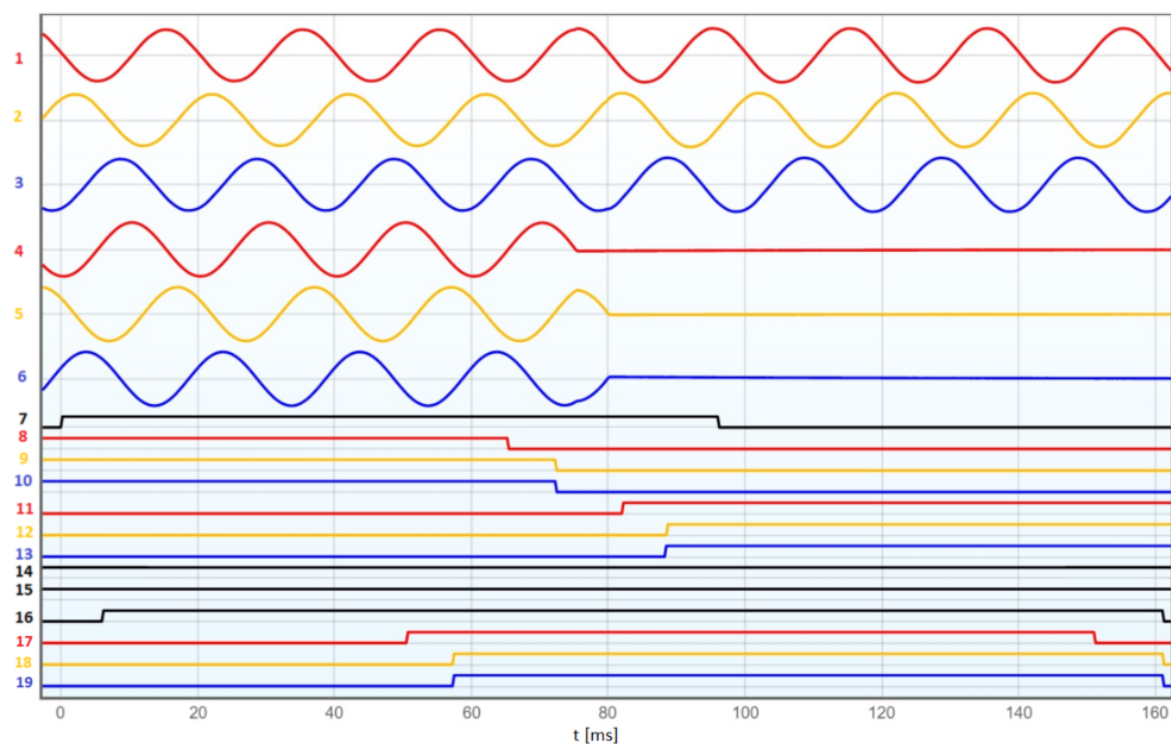
Datum		25.03.2020 21:56			26.03.2020 23:06			28.03.2020 0:02			28.03.2020 23:21:00			29.03.2020 22:08		
OP. Zapnutí	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Elektrická chyba operace	ms	0,06	-0,25	0,04	0,16	0,07	-0,12	0,06	0,03	-0,18	-0,12	-0,12	-0,10	0,00	-0,05	0,08
Elektrický provozní čas	ms	50,32	50,38	50,91	50,40	50,65	50,73	50,33	50,61	50,71	50,14	50,47	50,74	50,29	50,54	50,93
Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	50,26	50,63	50,88	50,24	50,58	50,85	50,28	50,58	50,88	50,26	50,59	50,84	50,29	50,59	50,85
Aktuální úhel zapínacího proudu	deg	270,9	55,33	300,59	62,71	301,1	267,8	270,92	60,39	296,73	57,64	297,66	268,02	269,9	58,99	301,4
Cílový úhel zapínacího proudu	deg	269,88	59,89	299,89	59,89	299,89	269,88	269,88	59,89	299,89	59,89	299,89	269,88	269,88	59,89	299,89
Mechanická chyba operace	ms	-0,49	-0,86	-1,49	-0,01	-0,88	-1,84	-0,34	-0,89	-1,58	0,13	-0,92	-0,91	-0,19	-1,31	-3,04
Mechanický provozní čas	ms	49,86	49,87	49,46	50,31	49,79	49,11	50,02	49,78	49,39	50,49	49,75	50,02	50,18	49,38	47,89
Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	50,35	50,73	50,96	50,33	50,66	50,95	50,36	50,68	50,97	50,36	50,68	50,92	50,37	50,68	50,93
Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	19,68	19,36	19,69	19,68	19,25	19,8	19,66	19,37	19,63	19,7	19,41	19,78	19,66	19,37	19,74
Mechanický čas pohybu	ms	32,74	33,36	33,08	33,24	33,39	32,57	32,93	33,26	33,07	33,4	33,19	33,59	33,11	32,82	31,28
Časové zpoždění	ms	40,53	40,53	40,53	44,51	44,51	44,51	46,34	46,34	46,34	47,63	47,63	47,63	43,3	43,3	43,3
Doba nečinnosti	h	15,58	15,58	15,58	14,71	14,71	14,71	17,8	17,8	17,8	16,74	16,74	16,74	15,29	15,29	15,29
DC řídicí napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Počet operací		278	278	278	279	279	279	280	280	280	281	281	281	282	282	282
Kumulované opotřebení přerušovače		278	278	278	279	279	279	280	280	280	281	281	281	282	282	282

Tab. 13 - Dopočetné časové hodnoty k Tab. 12 - Parametry operací zapnutí -2/2

Datum		25.03.2020 21:56			26.03.2020 23:06			28.03.2020 0:02			28.03.2020 23:21:00			29.03.2020 22:08		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	40,53	35,53	35,33	44,51	44,31	49,51	46,34	41,34	41,14	47,63	47,43	52,63	43,30	38,30	38,10
Rozpojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	60,21	54,89	55,02	64,19	63,56	69,31	66	60,71	60,77	67,33	66,84	72,41	62,96	57,67	57,84
Připojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	92,95	88,25	88,1	97,43	96,95	101,88	98,93	93,97	93,84	100,73	100,03	106	96,07	90,49	89,12
Rozdíl mezi sepnutím NC a počátkem průchodu proudu	ms	2,10	2,01	1,86	2,47	1,99	1,64	2,26	2,12	1,99	2,83	2,13	2,63	2,48	1,46	0,09
Počátek průchodu proudu	ms	90,85	86,24	86,24	94,96	94,96	100,24	96,67	91,85	91,85	97,9	97,9	103,37	93,59	89,03	89,03
Rozdíl mezi sepnutím fází	ms	4,61	-	-	-	-	5,28	4,82	-	-	-	-	5,47	4,56	-	-

Všechny tyto hodnoty mohou sloužit k mnoha vyhodnocením. Ať už jde o jednotlivé funkce mechanické či elektrické, dále v nalézání souvislostí a podobně.

3.3 Vypnutí

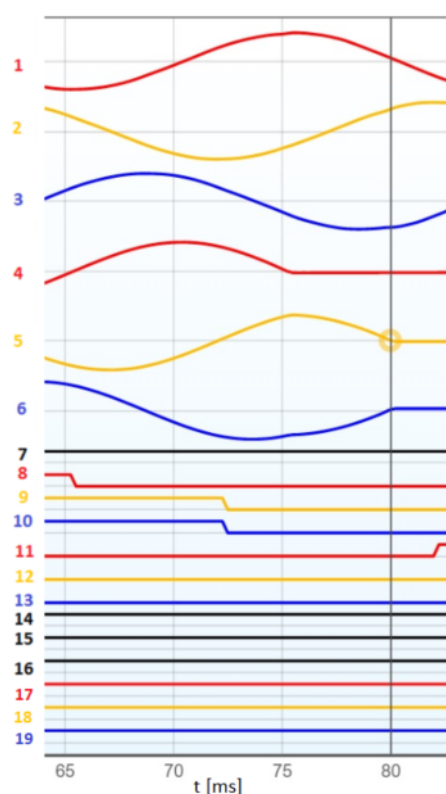


Obr. 20 - Grafický výstup vypnutí ze Switchsync

Tab. 14 - Význam jednotlivých částí z Obr. 20

Pořadí	X	Označení	Min	Max	Význam
1.		UL1	-9kV	+9kV	Napětí fáze L1
2.		UL2	-9kV	+9kV	Napětí fáze L2
3.		UL3	-9kV	+9kV	Napětí fáze L3
4.		IL1	-3514 A	+3514 A	Proud fáze L1
5.		IL2	-3474 A	+3474 A	Proud fáze L2
6.		IL3	-3502 A	+3502 A	Proud fáze L3
7.		OpenCmdIn	---	---	Operace vypnutí
8.		NO-L1	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L1
9.		NO-L2	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L2
10.		NO-L3	---	---	Stav pomocného pracovního kontaktu fáze L3
11.		NC-L1	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L1
12.		NC-L2	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L2
13.		NC-L3	---	---	Stav pomocného klidového kontaktu fáze L3
14.		1.01 OK	---	---	Přítomnost napětí 1.01
15.		1.11 OK	---	---	Přítomnost napětí 1.11
16.		StartPOW	---	---	Proces určení bodu na sinusové vlně signálu
17.		OpnCmdOutL1	---	---	Řízený vypinací povel vyslaný na vypínač fáze L1
18.		OpnCmdOutL1	---	---	Řízený vypinací povel vyslaný na vypínač fáze L2
19.		OpnCmdOutL1	---	---	Řízený vypinací povel vyslaný na vypínač fáze L3

Tab. 14 určuje jednotlivé části procesu vypnutí kompenzační tlumivky z Obr. 20. V bodech 1. – 3. je napětí zdroje. V bodech 4. – 6. je proud zdroje, který je v případě zapínání, referenčním signálem. Zde dojde v čase $t = 0$ k příkazu vykonání operace vypnutí kompenzační tlumivky ručně, z řídicího systému dispečerem, případně obsluhou (bod 7. OpenCmdln). Switchsync zhodnotí situaci, provede korekce a případné kompenzace parametrů, vezme v potaz všechny nastavené parametry a vyšle signály na jednotlivé fáze. V tomto sepnutí tedy na fázi L1, následně L2 a L3 (bod 15., 16., 17.).



Obr. 21 - Detail operace vypnutí

I v tomto případě jde stále o vypínání v izolované soustavě. Proud mezi jednotlivými fázemi je posunut standardně o 120° a je souměrný. Po vyslání vypínacího impulsu se uvedou v pohyb pomocné pracovní kontakty ve fázi L1 (bod 8.). Následně jsou uvedeny v pohyb současně pomocné pracovní kontakty ve fázi L2 a L3 (bod 9. a 10.), a to ideálně 90° po fázi L1. V bodě 11 dojde k sepnutí klidového kontaktu a následuje sepnutí klidového kontaktu fází L2 a L3 (Obr. 20). Přerušením elektrického oblouku ve fázi L1 dojde k vytvoření jediného proudového obvodu mezi fázemi L2 a L3. V těchto dvou fázích dochází k uhasnutí oblouku a přerušení proudu zhruba za 5ms, což odpovídá fázovému posunu 90° .

3.3.1 Výstupy operace vypnutí

Výstupy z této operace jsou uvedeny v Tab. 15. V tabulce můžeme vidět parametry, které Switchsync předpokládal svým odhadem či výpočtem a následné skutečné časy dané operace, včetně časů hoření oblouku.

Tab. 15 - Parametry operace vypnutí

Datum			30.03.2020 6:36		
Open operation		-	L1	L2	L3
Electrical target error	Elektrická chyba operace	ms	0,57	-0,41	-0,13
Electrical operating time	Elektrický provozní čas	ms	25,12	22,89	23,17
Predicted electrical operating time	Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	24,55	23,3	23,3
Arcing time	Čas hoření oblouku	ms	9,62	7,19	7,47
Target arcing time	Cílový čas hoření oblouku	ms	9,5	7,6	7,6
Mechanical target error	Mechanická chyba operace	ms	0,5	0,64	0,73
Mechanical operating time	Mechanický provozní čas	ms	16	16,34	16,43
Predicted mechanical operating time	Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	15,5	15,7	15,7
Initial mechanical delay time	Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	14,8	14,91	15,02
Mechanical moving time	Mechanický čas pohybu	ms	16,68	16,34	16,08
Controller delay time	Časové zpoždění	ms	57,32	57,32	57,32
Idle time	Doba nečinnosti	h	8,47	8,47	8,47
DC control voltage	DC řídicí napětí	V	220	220	220
Operation count	Počet operací		283	283	283
Interrupter wear	Opatřebení přerušovače		1	1	1
Cumulated interrupter wear	Kumulované opotřebení přerušovače		283	283	283

- **Elektrická chyba operace**

Ve fázi L1, byl předpoklad překročen o 0,57ms. Ve fázi L2 byl elektrický provozní čas o 0,041ms rychlejší, než byl její předpoklad. U fáze L3 byl rychlejší o 0,13ms. Elektrická chyba u této operace je mnohonásobně větší než u operace zapnutí.

- **Čas hoření oblouku**

Jde o skutečný čas hoření oblouku v jednotlivých fázích.

- **Cílový čas hoření oblouku**

Předpoklad časů hoření oblouků pro jednotlivé fáze. Rozdílem cílového (plánovaného) a aktuálního (skutečného) času hoření oblouku zjistíme odchylku výpočtu.

- **Mechanická chyba operace**

Ve všech fázích byl skutečný mechanický provozní čas mechanismu vypínače delší než plánovaný provozní mechanický čas. Ve fázi L1 o 0,5ms, ve fázi L2 o 0,64ms a ve fázi L3 o 0,73ms. Mechanické časy operace vypnutí jsou nižší ve srovnání s operací zapnutí.

- **Počáteční mechanický čas zpoždění**
Jde o dobu od povelu (vypnutí vypínače) k rozpojení pracovního kontaktu (NO). [4]
- **Mechanický čas pohybu u vypnutí**
Jde o dobu od rozpojení kontaktu pracovního (NO) k sepnutí klidového kontaktu vypínače (NC). [5]

3.3.2 Výstupy operace vypnutí – zjištění

Součástí operace vypnutí jsou částečně reciproční mezikroky oproti operaci zapnutí. Výpočtem jsou určeny tyto mezikroky, či spíše „mezistavy“ a jsou uvedeny v Tab. 16.

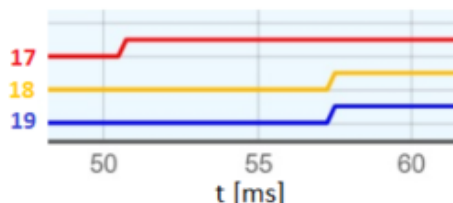
Tab. 16 - Vypočtené časy jednotlivých mezikroků vypnutí

Datum		30.03.2020 6:36		
Close operation	-	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	52,32	57,32	57,32
Rozpojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	67,12	72,23	72,34
Připojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	83,80	88,57	88,42
Rozdíl mezi odpojením NO a přerušením průchodu proudu	ms	6,36	8,36	8,21
Počátek přerušení proudu	ms	77,44	80,21	80,21
Rozdíl mezi přerušením proudu L1 a L2/L3	ms	2,77	-	-

V případě operace vypnutí, je vždy nastavena předstihová fáze pevně na fázi L1. V Tab. 15 je opět shodně nastaven čas zpoždění u všech fází. Ve skutečnosti tomu je také jinak.

3.3.2.1 Skutečné časové zpoždění operace vypnutí

V tomto případě u pevně zvolené předstihové fáze L1 bude tato fáze odpojena první. Následně budou téměř v témže čase odpojeny fáze L2 a L3, a to 90° po fázi L1.



Obr. 22 - Detail řízených vypínacích povelů

Z výstřižku výstupů ze Switchsync na Obr. 22 je jasné, že k časovému zpoždění nedochází shodně v čase 57,32ms dle Tab. 15. Tento čas platí pro vyslání vypínacího povelu k vypnutí fází L2 a L3. Fáze L1, musí být odepnuta nejlépe 90° před fázemi L2 a L3. Proto dochází, 5ms před impulsem k celkovému odpojení obvodu, k řízenému vypínacímu povelu pro odpojení fáze L1. Tento povel je vyslán v čase 52,32ms. Následně v čase 57,32ms dochází k vyslání řízenému vypínacímu povelu na zbývajících dvě fáze. V tomto čase je obsažena doba, kterou Switchsync vyhodnocuje nejlepší možnost pro samotné vypnutí na základě předchozích sepnutí a korekcí.

3.3.2.2 Rozpojení pomocného pracovního kontaktu (NO)

Vlivem vyslání řízených vypínacích povelů musí dojít v první řadě k rozpojení pracovního kontaktu (NO) a připojení klidového kontaktu (NC).

Součet časů skutečného časového zpoždění z Tab. 16 a času počátečního mechanického zpoždění z Tab. 15 udává čas rozpojení pomocného pracovního kontaktu. Tento skutečný čas rozpojení pracovního kontaktu je uveden v Tab. 16 a je pro L1 – 67,12ms, L2 – 72,23ms a pro L3 – 72,34ms.

3.3.2.3 Sepnutí pomocného klidového kontaktu (NC)

Po rozpojení pracovního kontaktu (NO) dochází k mechanickému pohybu kontaktů. Součtem mechanického času pohybu z Tab. 15 a skutečného času rozpojení pracovního kontaktu, jsme schopni určit skutečný čas sepnutí pomocného klidového kontaktu (NC). Ten je taktéž uveden v Tab. 16 a jeho časové hodnoty jsou pro L1 – 83,8ms, L2 – 88,57ms a pro L3 – 88,42ms.

3.3.2.4 Počátek přerušení proudu

Mohli bychom říci, že časem sepnutí klidového pracovního kontaktu dojde k celkovému odpojení obvodu. K odpojení elektrického proudu však dojde o několik málo chvil před tímto sepnutím klidového kontaktu. Sepnutím klidového kontaktu rozumíme vypínač v poloze vypnuto.

V čase 67,12ms dochází ve fázi L1 k odpojení pracovního kontaktu a dochází působením vypínacích pružin k oddálení kontaktů. Při tomto oddalování kontaktů dochází kvůli přerušování elektrického proudu o velmi násilnou změnu ustáleného energetického toku. Vlivem této změny dochází ke vzniku elektrického oblouku. Stejný proces začíná ve fázích L2 a L3 v čase 72,23ms a 72,34ms při odpojení pracovního kontaktu. K přerušení elektrického oblouku dojde v momentě, kdy se obnoví elektrická pevnost mezi kontakty, nejpozději však při styku s pomocným klidovým kontaktem, kdy dochází k vyfouknutí plynu SF6 a uhasnutí oblouku.

Ve fázi L1 dochází k připojení klidového kontaktu v čase 83,8ms, ovšem k počátku přerušení proudu v téže fázi dochází již v čase 77,44ms. Domnívám se, že právě onen časový rozdíl je délka hoření oblouku při přechodu od pracovního kontaktu po klidový kontakt. Tento rozdíl, případně délka hoření oblouku mezi těmito kontakty je 6,36ms. [4]

Ve fázích L2 a L3 dochází k připojení klidového kontaktu v čase 88,57ms a 88,42ms, kdy k počátku přerušení proudu dochází již v časech 80,21ms. Časový rozdíl nebo také délka oblouku při přechodu mezi jednotlivými kontakty je 8,36ms pro L2 a 8,21ms pro L3. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 16.

Z výsledných časů počátků odpojení proudů můžeme říci, že k odpojení fází L2 a L3 došlo 2,77ms po odpojení fáze L1.

3.3.3 Operace vypnutí – další výstupy

V tabulkách níže, jsou uvedeny hodnoty a parametry deseti operací vypnutí. Předstihová fáze je pevně zvolena na fázi L1, která je označená žlutě. Pro tyto výstupy jsou taktéž vypočteny a odvozeny další parametry operace vypnutí, dle kapitoly 3.3.2. Tyto výstupy jsou dále použity v kapitole 4.2.4, kde dochází k jejich porovnání s výstupy, kde je využita teplotní kompenzační křivka na základě snímání venkovní teploty okolí.

Tab. 17 - Parametry operací vypnutí 1/2

Datum		18.03.2020 6:22			22.03.2020 5:52			23.03.2020 5:25			24.03.2020 6:15			25.03.2020 6:21		
Open operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Elektrická chyba operace	ms	0,34	-0,17	-0,14	0,30	-0,18	0,07	0,38	0,11	0,10	0,24	-0,05	-0,05	0,14	0,09	-0,26
Elektrický provozní čas	ms	24,89	23,13	23,16	24,85	23,12	23,37	24,93	23,41	23,40	24,79	23,25	23,25	24,69	23,39	23,04
Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3
Čas hoření oblouku	ms	9,39	7,43	7,46	9,39	7,42	7,67	9,43	7,71	7,7	9,29	7,55	7,55	9,19	7,69	7,34
Cílový čas hoření oblouku	ms	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6
Mechanická chyba operace	ms	0,39	0,69	0,73	0,48	0,73	0,73	0,44	0,73	0,73	0,5	0,7	0,65	0,42	0,67	0,67
Mechanický provozní čas	ms	15,89	16,39	16,43	15,98	16,43	16,43	15,94	16,43	16,43	16	16,4	16,35	15,92	16,37	16,37
Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7
Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	14,72	14,92	14,98	14,79	14,97	15,02	14,77	14,97	14,99	14,82	14,94	14,92	14,74	14,94	14,97
Mechanický čas pohybu	ms	16,33	16,73	16,46	16,62	16,54	16,05	16,34	16,65	16,32	16,58	16,6	16,24	16,52	16,31	15,9
Časové zpoždění	ms	50,91	50,91	50,91	47,47	47,47	47,47	46,04	46,04	46,04	56,43	56,43	56,43	47,76	47,76	47,76
Doba nečinnosti	h	8,37	8,37	8,37	4,77	4,77	4,77	28,1	28,1	28,1	5,98	5,98	5,98	6,74	6,74	6,74
DC řídící napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Počet operací		274	274	274	275	275	275	276	276	276	277	277	277	278	278	278
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kumulované opotřebení přerušovače		274	274	274	275	275	275	276	276	276	277	277	277	278	278	278

Tab. 18 - Dopočtené časové hodnoty k Tab. 17 - Parametry operací vypnutí 1/2

Datum		18.03.2020 6:22			22.03.2020 5:52			23.03.2020 5:25			24.03.2020 6:15			25.03.2020 6:21		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	45,91	50,91	50,91	42,47	47,47	47,47	41,04	46,04	46,04	51,43	56,43	56,43	42,76	47,76	47,76
Rozpojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	60,63	65,83	65,89	57,26	62,44	62,49	55,81	61,01	61,03	66,25	71,37	71,35	57,5	62,7	62,73
Připojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	76,96	82,56	82,35	73,88	78,98	78,54	72,15	77,66	77,35	82,83	87,97	87,59	74,02	79,01	78,63
Rozdíl mezi odpojením NO a přerušením průchodu proudu	ms	6,16	8,52	8,28	6,56	8,39	7,70	6,18	8,21	7,91	6,61	8,29	7,91	6,57	7,86	7,83
Počátek přerušení proudu	ms	70,80	74,04	74,07	67,32	70,59	70,84	65,97	69,45	69,44	76,22	79,68	79,68	67,45	71,15	70,80
Rozdíl mezi přerušením proudu L1 a L2/L3	ms	3,27	-	-	3,27	-	-	3,48	-	-	3,46	-	-	3,70	-	-

Tab. 19 - Parametry operací zapnutí - 2/2

Datum		26.03.2020 8:23			27.03.2020 6:14			28.03.2020 6:36			29.03.2020 6:50			30.03.2020 6:36		
Open operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Elektrická chyba operace	ms	0,29	-0,20	0,06	0,39	-0,34	0,00	0,23	-0,27	-0,01	0,27	-0,25	0,04	0,57	-0,41	-0,13
Elektrický provozní čas	ms	24,84	23,10	23,36	24,94	22,96	23,30	24,78	23,03	23,29	24,82	23,05	23,34	25,12	22,89	23,17
Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3	24,55	23,3	23,3
Čas hoření oblouku	ms	9,34	7,4	7,66	9,44	7,26	7,6	9,28	7,33	7,59	9,32	7,35	7,64	9,62	7,19	7,47
Cílový čas hoření oblouku	ms	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6
Mechanická chyba operace	ms	0,36	0,77	0,67	0,5	0,56	0,7	0,46	0,74	0,75	0,41	0,67	0,69	0,5	0,64	0,73
Mechanický provozní čas	ms	15,86	16,47	16,37	16	16,26	16,4	15,96	16,44	16,45	15,91	16,37	16,39	16	16,34	16,43
Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7	15,5	15,7	15,7
Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	14,69	15	14,97	14,8	14,79	14,99	14,78	14,98	15,05	14,73	14,92	14,95	14,8	14,91	15,02
Mechanický čas pohybu	ms	16,41	16,78	15,97	16,82	16,77	16	16,45	16,58	15,97	16,53	16,59	16,39	16,68	16,34	16,08
Časové zpoždění	ms	52,87	52,87	52,87	50,5	50,5	50,5	50,35	50,35	50,35	60,47	60,47	60,47	57,32	57,32	57,32
Doba nečinnosti	h	10,45	10,45	10,45	7,13	7,13	7,13	6,57	6,57	6,57	6,49	6,49	6,49	8,47	8,47	8,47
DC řídící napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Počet operací		279	279	279	280	280	280	281	281	281	282	282	282	283	283	283
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kumulované opotřebení přerušovače		279	279	279	280	280	280	281	281	281	282	282	282	283	283	283

Tab. 20 - Dopočtené časové hodnoty k Tab. 19 - Parametry operací zapnutí - 2/2

Datum		26.03.2020 8:23			27.03.2020 6:14			28.03.2020 6:36			29.03.2020 6:50			30.03.2020 6:36		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	47,87	52,87	52,87	45,5	50,5	50,5	45,35	50,35	50,35	55,47	60,47	60,47	52,32	57,32	57,32
Rozpojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	62,56	67,87	67,84	60,3	65,29	65,49	60,13	65,33	65,4	70,2	75,39	75,42	67,12	72,23	72,34
Připojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	78,97	84,65	83,81	77,12	82,06	81,49	76,58	81,91	81,37	86,73	91,98	91,81	83,80	88,57	88,42
Rozdíl mezi odpojením NO a přerušením průchodu proudu	ms	6,26	8,68	7,58	6,68	8,60	7,69	6,45	8,53	7,73	6,44	8,46	8,00	6,36	8,36	8,21
Počátek přerušení proudu	ms	72,71	75,97	76,23	70,44	73,46	73,80	70,13	73,38	73,64	80,29	83,52	83,81	77,44	80,21	80,21
Rozdíl mezi přerušením proudu L1 a L2/L3	ms	3,52	-	-	3,36	-	-	3,51	-	-	3,52	-	-	2,77	-	-

4 TEPLOTNÍ KOMPENZACE V LIMITNÍCH PODMÍNKÁCH TEPLOT

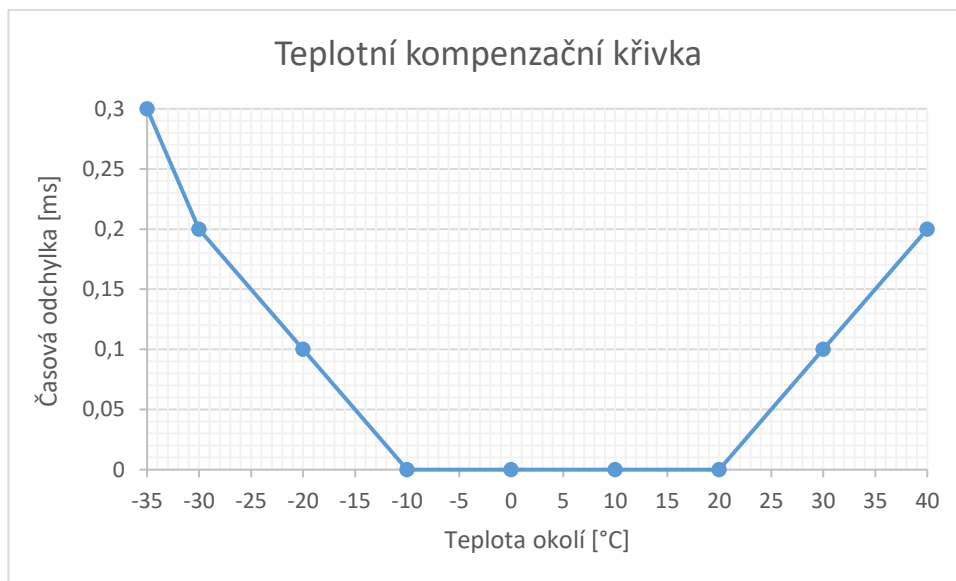
Jak již bylo uvedeno několikrát, řízené spínání a jeho optimalizace je ovlivněna mnoha faktory. Jedním z těchto faktorů je okolní teplota, jejímž vlivem se mohou měnit časy spínání vypínače. Následně Switchsync optimalizuje přesnost pomocí adaptivní korekce, která z binárních signálů vyhodnotí před sepnutím i vliv teploty okolí. K tomu ovšem zařízení potřebuje vhodně nastavenou teplotní kompenzační křivku.

4.1 Teplotní kompenzace

Na základě bakalářské práce, úsilí a pomoci několika kolegů, byla jedna ze dvou kompenzačních tlumivek v terciárech transformátorů 400/110/10,5kV elektrické stanice připravena k možnosti spínání s teplotní kompenzací. Nejjednodušším a nejvhodnějším řešením se po dohodě a doporučení výrobce jeví vzít v potaz venkovní teplotu okolí snímanou z venkovního čidla, které nebude vzdáleno od místa spínání více než 100 metrů. V rámci zamezení nežádoucích okolních vlivů, jako jsou povětrnostní vlivy, přímé sluneční záření a podobně, bylo teplotní čidlo opatřeno vhodně navrženou clonou (ochranou proti slunci), která tyto vlivy minimalizuje. Tím byly požadované parametry snímání teploty okolí splněny. Switchsync tedy dostal přístup k aktuální venkovní teplotě okolí, kterou získává z řídicího systému pomocí GOOSE zpráv. Teplota je spřažena s výpočtem pro spínání předstihové fáze L1. Pro následující fáze tato teplota není podstatná, což je zřejmé z předdefinovaných strategií pro spínání kompenzační tlumivky v Tab. 4 a Tab. 6. Posledním krokem bylo vložení vhodné teplotní kompenzační křivky do zařízení Switchsync.

4.1.1 Teplotní kompenzační křivka

Teplotní kompenzační křivka byla zvolena na doporučení výrobce vypínače. Je určena pro teploty od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. V rozmezí teplot od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ není určena časová kompenzace pro mechanické spínací časy, proto je časová odchylka nulová. Ve zbylém rozmezí teplot je určena časová odchylka, kterou Switchsync bere v úvahu pro optimalizaci sepnutí. Kompenzační křivka je na Obr. 23 a její hodnoty v Tab. 21.



Obr. 23 - Teplotní kompenzační křivka vložená do Switchsync PWC600

Tab. 21 - Závislost teploty okolí na časové odchylce mechanických spínacích časů z teplotní kompenzační křivky

Teplota okolí [°C]	Časová odchylka [ms]
-35	0,3
-30	0,2
-20	0,1
-10	0
0	0
10	0
20	0
30	0,1
40	0,2

Switchsync vyhodnotí hodnoty funkcí kompenzace parametrů a adaptivní korekce, předchozích sepnutí a na základě aktuální teploty okolí, dle této kompenzační křivky, upraví předpoklad sepnutí, a tedy předpoklad sepnutí mechanické části vypínače. Tzv. předpokládaný čas mechanického sepnutí. Korekce kompenzační křivky jsou v maximální kladné limitní hodnotě 0,2ms a v záporné 0,3ms. Nevýhodou je, že prostředí Switchsync a výstupy z něj nejsou schopny pro uživatele zobrazit předpokládané úpravy časů na základě teplotní korekce, a proto výstupy a závěry pro tuto funkci mohou být lehce rozporuplné, obzvláště pokud se teplotně pohybujeme pouze lehce nad korekčními hodnotami (nad +20 °C a pod -10 °C).

4.2 Zapnutí

Princip a výstupy ze Switchsync jsou jak pro zapnutí kompenzační tlumivky s teplotní kompenzací, tak pro zapnutí bez teplotní kompenzace zcela stejné. Grafický průběh a základní principy jsou blíže znázorněny v kapitole 3.2. I u zapnutí s teplotní kompenzací, je přednastavena volba předstihové fáze na náhodnou volbu.

Protože Switchsync není schopen zobrazit nastavené kompenzační parametry operace zapnutí a každý vypínač má své rozdílné parametry, je níže použito k vyhodnocení 10 operací zapnutí, včetně dopočetných parametrů. Tyto operace jsou rozděleny na polovinu, kdy víme, že kompenzační křivka mohla hrát alespoň malou roli a kdy kompenzační křivka redukuje v rámci nulových hodnot, čili operace jsou bez kompenzace teplotní.

4.2.1 Zapnutí – Základní parametry

Jak je uvedeno na Obr. 23, v rozmezí teplot od -10 °C do +20 °C, kompenzační křivka nabývá nulových hodnot. Protože environmentální vlivy tomu nechtějí, teploty pod -10 °C v dostupných výstupech ze Switchsync, nejsou dostupné. Z dostupných hodnot v rámci teplot nad +20 °C, bylo nalezeno několik sepnutí a jsou zobrazeny v Tab. 22. Ovšem jde pouze o parametry, které lehce překračují tuto hranici.

Tab. 22 - Parametry sepnutí s využitím kompenzační křivky

	B- s kompenzací	S teplotní kompenzací															
Datum	Datum		22.08.2019 13:30			22.08.2019 13:42			29.08.2019 0:31			31.08.2019 21:40			01.09.2019 23:35		
Close operation	OP. Zapnutí	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Electrical target error	Elektrická chyba operace	ms	0,19	0,10	0,08	0,20	0,14	0,27	-0,12	0,11	0,15	0,26	0,15	0,11	-0,03	0,23	-0,03
Electrical operating time	Elektrický provozní čas	ms	51,36	50,38	50,24	51,14	50,43	50,34	51,08	50,42	50,32	51,47	50,47	50,30	51,08	50,33	50,20
Predicted electrical operating time	Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	51,18	50,28	50,16	50,95	50,28	50,08	51,2	50,31	50,18	51,21	50,32	50,2	51,11	50,11	50,22
Current making angle	Aktuální úhel zapínacího proudu	deg	63,25	301,76	271,25	273,42	62,46	304,74	57,79	301,9	272,5	64,56	302,54	271,8	299,3	273,95	59,41
Target current making angle	Cílový úhel zapínacího proudu	deg	59,89	299,89	269,88	269,88	59,89	299,89	59,89	299,89	269,88	59,89	299,89	269,88	299,89	269,88	59,89
Mechanical target error	Mechanická chyba operace	ms	0,11	-0,6	-0,32	0,13	-0,47	0,06	0,14	-0,19	0,41	-0,04	0,25	-0,95	0,25	-0,51	-0,1
Mechanical operating time	Mechanický provozní čas	ms	51,36	49,77	49,92	51,17	49,9	50,22	51,44	50,2	50,67	51,26	50,66	49,33	51,45	49,7	50,21
Predicted mechanical operating time	Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	51,26	50,37	50,24	51,04	50,37	50,16	51,3	50,39	50,26	51,3	50,42	50,28	51,2	50,2	50,31
Initial mechanical delay time	Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	17,78	21,79	20,52	17,79	21,54	20,44	17,81	21,75	20,67	17,63	21,76	20,57	17,72	21,74	20,61
Mechanical moving time	Mechanický čas pohybu	ms	34,29	31,95	31,89	34,07	32,38	32,3	34,32	32,49	32,54	34,32	33	31,2	34,43	31,92	32,1
Controller delay time	Časové zpoždění	ms	37,92	37,92	37,92	38,58	38,58	38,58	45,7	45,7	45,7	37,67	37,67	37,67	40,98	40,98	40,98
Idle time	Doba nečinnosti	h	79,68	79,68	79,68	0,11	0,11	0,11	85,42	85,42	85,42	14,59	14,59	14,59	15,49	15,49	15,49
Temperature	Teplota	°C	21,12	0	0	21,56	0	0	21	0	0	20,19	0	0	20,5	0	0
DC control voltage	DC řídící napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Operation count	Počet operací		154	153	153	155	154	154	157	156	156	159	158	158	160	159	159
Cumulated interrupter wear	Kumulované opotřebení přerušovače		135	135	135	136	136	136	138	138	138	140	140	140	141	141	141

Protože teplotní kompenzace v první řadě má mít vliv hlavně na mechanickou stránku spínání, nejdůležitější bude porovnání mechanického času pohybu vypínače a rozdílů předpokládaného mechanického provozního času a skutečného provozního času mezi spínáním s využitím

kompenzační křivky (Tab. 22) a bez využití kompenzační křivky (Tab. 23). Dále samozřejmě mechanické chyby operací.

Tab. 23 - Parametry sepnutí, bez využití kompenzační křivky

Datum	B- s kompenzací		Bez využití kompenzační křivky														
	Datum		25.08.2019 0:00			31.08.2019 1:52			03.09.2019 15:13			06.01.2020 22:23			01.02.2020 22:15		
Close operation	OP. Zapnutí	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Electrical target error	Elektrická chyba operace	ms	0,00	0,04	0,28	0,17	0,05	0,00	-0,15	-0,18	-0,13	-0,06	0,16	-0,16	-0,19	0,00	0,12
Electrical operating time	Elektrický provozní čas	ms	50,99	50,33	50,39	51,34	50,36	50,20	51,10	50,18	50,08	50,89	50,42	49,97	50,81	50,36	50,14
Predicted electrical operating time	Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	50,98	50,28	50,11	51,18	50,31	50,19	51,25	50,36	50,21	50,95	50,26	50,13	51	50,36	50,02
Current making angle	Aktuální úhel zapínacího proudu	deg	269,96	60,68	304,85	62,87	300,78	269,92	57,21	296,68	267,48	298,74	272,76	56,92	266,52	59,81	301,99
Target current making angle	Cílový úhel zapínacího proudu	deg	269,88	59,89	299,89	59,89	299,89	269,88	59,89	299,89	269,88	299,89	269,88	59,89	269,88	59,89	299,89
Mechanical target error	Mechanická chyba operace	ms	-0,24	-0,47	-0,4	0,21	-0,97	-0,17	0,12	0,05	-0,76	-0,62	0,06	-1,47	-1,33	-0,51	-0,75
Mechanical operating time	Mechanický provozní čas	ms	50,82	49,91	49,8	51,47	49,43	50,11	51,47	50,5	49,54	50,42	50,4	48,75	49,76	49,93	49,36
Predicted mechanical operating time	Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	51,07	50,38	50,2	51,26	50,4	50,28	51,35	50,44	50,3	51,04	50,35	50,23	51,09	50,44	50,1
Initial mechanical delay time	Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	17,74	21,61	20,6	17,68	21,69	20,6	17,59	21,75	20,38	17,7	21,88	19,69	17,77	21,58	19,89
Mechanical moving time	Mechanický čas pohybu	ms	33,77	32,31	32,26	34,49	31,68	32,01	34,59	32,82	31,63	33,4	32,57	31,53	32,66	32,37	31,97
Controller delay time	Časové zpoždění	ms	41,2	41,2	41,2	40,4	40,4	40,4	40,97	40,97	40,97	44,25	44,25	44,25	45,17	45,17	45,17
Idle time	Doba nečinnosti	h	58,3	58,3	58,3	43,67	43,67	43,67	33,18	33,18	33,18	29,59	29,59	29,59	614,63	614,63	614,63
Temperature	Teplota	°C	17,91	0	0	18,01	0	0	19,5	0	0	-4,64	0	0	11,41	0	0
DC control voltage	DC řídicí napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Operation count	Počet operací		156	155	155	158	157	157	161	160	160	210	209	209	211	210	210
Cumulated interrupter wear	Kumulované opotřebení přerušovače		137	137	137	139	139	139	142	142	142	191	191	191	192	192	192

V Tab. 23 je uvedeno 5 sepnutí stejným vypínačem a stejné zátěže jako je uvedeno v Tab. 22, kde teploty venkovního okolí jsou v rozmezí teplot od -10 °C do +20 °C, takže kompenzační křivka nabývá nulových hodnot a Switchsync teplotu okolí v rámci kompenzace a nastavení parametrů nebere v potaz.

4.2.2 Zapnutí – porovnání základních parametrů

Tab. 24 - Porovnání základních parametrů s využitím kompenzační křivky a bez využití kompenzační křivky

Operace zapnutí		S využitím kompenzační křivky			Bez využití kompenzační křivky		
		Celkem	Průměr na sepnutí	Průměr na fázi	Celkem	Průměr na sepnutí	Průměr na fázi
Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	757,790	151,558	50,519	757,590	151,518	50,506
Elektrický provozní čas	ms	759,560	151,912	50,637	757,560	151,512	50,504
Rozdíl předpoklad / skutečnost	ms	1,770	0,354	0,118	-0,030	-0,006	-0,002
Elektrická chyba operace	ms	2,170	0,434	0,145	1,530	0,306	0,102
Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	759,100	151,820	50,607	758,930	151,786	50,595
Mechanický provozní čas	ms	757,260	151,452	50,484	751,670	150,334	50,111
Rozdíl předpoklad / skutečnost	ms	-1,840	-0,368	-0,123	-7,260	-1,452	-0,484
Mechanická chyba operace	ms	4,530	0,906	0,302	8,130	1,626	0,542
Mechanický čas pohybu	ms	493,200	98,640	32,880	490,060	98,012	32,671
Časové zpoždění	ms	602,550	120,510	40,170	635,970	127,194	42,398

V Tab. 24 jsou uvedeny průměry hodnot s a bez využití hodnocení kompenzační křivky k operaci zapnutí. Ani jeden z hodnocených parametrů z Tab. 22 a Tab. 23 nikterak nevybočoval z řady, proto vnímám tyto hodnoty jako korektní.

4.2.2.1 Elektrické parametry

U parametrů, kde byla pro korekci využita kompenzační křivka, je elektrický provozní čas v průměru o 0,118ms rychlejší než jeho předpoklad. Dochází zde tedy průměrně k předčasnému času o 0,118ms na každé fázi oproti předpokladu. Sečtením všech elektrických chyb (bez ohledu na znaménko časového údaje chyb), dochází k průměrné nepřesnosti na jednu fázi 0,145ms.

Parametry bez využití teplotní kompenzace na základě kompenzační křivky mají elektrický provozní čas téměř shodný jako pro předpoklad, tak pro skutečnost. Rozdíl je pouze -0,002ms. Avšak celkový časový součet elektrické chyby činí průměrně 0,102ms na fázi.

Na základě vyhodnocení použitých vzorků a parametrů operace zapnutí jsou elektrické parametry přesnější a dochází k menším chybám u spínání bez uvažování kompenzace venkovní teploty, případně tedy a přesněji s nulovou hodnotou teplotní kompenzace.

4.2.2.2 Mechanické parametry

Z hodnot parametrů, kde je využita teplotní kompenzace vyplývá, že celkový mechanický provozní čas je ve skutečnosti lepší než mechanický čas předpokládaný. Průměrně mechanismus vypínače byl v každé fázi rychlejší o 0,123ms, než byl jeho předpoklad. Ovšem součet celkových

chyb mechanismu bez ohledu na znaménko činí průměrně 0,906ms na jednu operaci, což je průměrně 0,302ms vnímána jako mechanická chyba operace.

Bez kompenzace spínání kompenzační křivkou jsou mechanické časy ještě rychlejší. Průměrně mechanismus vypínače je rychlejší na jedno sepnutí o 1,452ms, což činí průměrnou hodnotu 0,484ms na jednu fázi. Tedy mnohem rychlejší, než byl původní předpoklad sepnutí. Tím však vzniká velký rozdíl mezi předpokladem a skutečností, kdy celková průměrná mechanická chyba operace na jednu fázi činí 0,542ms, což je hodnota již velmi vysoká.

Byť se tedy jeví, že mechanismus vypínače pracuje rychleji v režimu s využitím kompenzační křivky v jejich nulových hodnotách, vzniká velký rozdíl v predikci a skutečnosti, čímž vzniká i větší mechanická chyba operace než u zapínací operace s využitím kladných hodnot kompenzační křivky. Z Tab. 24 celkem jasně vyplývá, že v prvním případě (Využití komp. křivky) jsou mechanické parametry více přesnější.

Zajímavostí je, že i časové zpoždění, tedy čas, než dojde k vyslání řízeného povelu k zapnutí u využití komp. křivky je průměrně o 2,228ms menší než u teplot, kde nemůžeme využít kompenzační křivku.

4.2.3 Zapnutí – odvozené parametry

Na základě parametrů operace zapnutí ze Switchsync, jsou zde dopočteny další odvozené parametry, které je možné také analyzovat a porovnávat. Parametry obsažené v Tab. 25, jsou odvozenými a vypočtenými parametry, kdy dochází k teplotní kompenzaci v zařízení Switchsync. V Tab. 26 jsou parametry, kdy sice Switchsync teplotní kompenzační křivku má, ale nevyužije jí, protože venkovní teploty jsou v rozmezí od -10 °C po +20 °C.

Tab. 25 - Odvozené parametry k operaci zapnutí s využitím teplotní kompenzace

Datum		22.08.2019 13:30			22.08.2019 13:42			29.08.2019 0:31			31.08.2019 21:40			01.09.2019 23:35		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	37,92	38,12	42,92	38,58	33,58	33,78	45,7	45,9	50,9	37,67	37,87	42,87	40,98	46,18	41,18
Rozpojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	55,7	59,91	63,44	56,37	55,12	54,22	63,51	67,65	71,57	55,3	59,63	63,44	58,7	67,92	61,79
Připojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	89,99	91,86	95,33	90,44	87,5	86,52	97,83	100,14	104,11	89,62	92,63	94,64	93,13	99,84	93,89
Rozdíl mezi sepnutím NC a počátkem průchodu proudu	ms	0,71	3,36	2,17	0,72	3,49	2,40	1,05	3,82	2,89	0,48	4,29	1,47	1,07	3,33	2,51
Počátek průchodu proudu	ms	89,28	88,50	93,16	89,72	84,01	84,12	96,78	96,32	101,22	89,14	88,34	93,17	92,06	96,51	91,38
Rozdíl mezi sepnutím fází	ms	3,88			5,60			4,44			4,03			4,45		

Tab. 26 - Odvozené parametry k operaci zapnutí bez využití teplotní kompenzace

Datum		25.08.2019 0:00			31.08.2019 1:52			03.09.2019 15:13			06.01.2020 22:23			01.02.2020 22:15		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	41,2	36,2	36,4	40,4	40,6	45,6	40,97	41,17	46,17	44,25	49,45	44,45	45,17	40,17	40,37
Rozpojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	58,94	57,81	57	58,08	62,29	66,2	58,56	62,92	66,55	61,95	71,33	64,14	62,94	61,75	60,26
Připojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	92,71	90,12	89,26	92,57	93,97	98,21	93,15	95,74	98,18	95,35	103,9	95,67	95,6	94,12	92,23
Rozdíl mezi sepnutím NC a počátkem průchodu proudu	ms	0,52	3,59	2,47	0,83	3,01	2,41	1,08	4,39	1,93	0,21	4,03	1,25	-0,38	3,59	1,72
Počátek průchodu proudu	ms	92,19	86,53	86,79	91,74	90,96	95,80	92,07	91,35	96,25	95,14	99,87	94,42	95,98	90,53	90,51
Rozdíl mezi sepnutím fází	ms	5,40			4,06			4,18			4,73			5,45		

4.2.4 Porovnání parametrů zapínání s kompenzační teplotní křivkou a bez ní.

Tab. 27 - Parametry vypínače s kompenzační teplotní křivkou a bez ní

Operace zapnutí		Vypínač s teplotní kompenzací - A			Vypínač bez teplotní kompenzace - B		
		Celkem	Průměr na	Průměr na	Celkem	Průměr na	Průměr na
Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	757,790	151,558	50,519	1516,730	151,673	50,558
Elektrický provozní čas	ms	759,560	151,912	50,637	1517,250	151,725	50,575
Rozdíl předpoklad / skutečnost	ms	1,770	0,354	0,118	0,520	0,052	0,017
Elektrická chyba operace	ms	2,170	0,434	0,145	2,920	0,292	0,097
Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	759,100	151,820	50,607	1519,380	151,938	50,646
Mechanický provozní čas	ms	757,260	151,452	50,484	1491,040	149,104	49,701
Rozdíl předpoklad / skutečnost	ms	-1,840	-0,368	-0,123	-28,340	-2,834	-0,945
Mechanická chyba operace	ms	4,530	0,906	0,302	29,300	2,930	0,977
Mechanický čas pohybu	ms	493,200	98,640	32,880	991,270	99,127	33,042
Časové zpoždění	ms	602,550	120,510	40,170	1296,300	129,630	43,210

V rámci porovnání parametrů a možnosti vyhodnocení, zda teplotní kompenzace má či nemá smysl, jsou v Tab. 27 porovnány hodnoty dvou vypínačů, které mají stejné štítkové parametry a jsou umístěny ve stejné elektrické stanici. Rozdílem těchto dvou vypínačů, u kterých je řízeno spínání zařízením Switchsync PWC600 je nastavení tohoto zařízení. Nastavení ve smyslu teplotní kompenzační křivky. Pro lepší přehled, nazvěme vypínač, jehož spínání řídí Switchsync s nastavenou teplotní kompenzační křivkou, vypínačem A. Vypínač B, bude tedy také řízen pomocí Switchsync, ale bez teplotní kompenzační křivky.

Parametry zapnutí vypínače A, jsou uvedeny v Tab. 22 a je zde 5 sepnutí, kde víme, že teplotní kompenzační křivka může hrát svou roli. Vyhodnocení tohoto vypínače A je v kapitole 4.2.

Parametry zapnutí vypínače B, jsou uvedeny v Tab. 10 a Tab. 12. V těchto tabulkách je 10 operací zapnutí, které budou porovnávány s operací zapnutí vypínače A s teplotní kompenzací.

4.2.4.1 Elektrické parametry

Vypínač A:

Rozdíl předpokládaného elektrického času a skutečného elektrického provozního času je průměrně 0,118ms na jednu fázi. Součet elektrických chyb operací (bez ohledu na kladnou či zápornou hodnotu) a jejich zprůměrování, nabývá hodnoty 0,145ms na jednu fázi.

Vypínač B:

Rozdíl předpokládaného a skutečného elektrického času je v průměru na jednu fázi 0,017ms. Součet elektrických chyb operace činí průměrně na jednu fázi 0,097ms.

Časy elektrických parametrů vypínače B jsou příznivější, než u vypínače A, jehož operace zapnutí jsou řízeny i s ohledem teploty okolí.

4.2.4.2 Mechanické parametry

Vypínač A:

Mechanický provozní čas vypínače A je o 0,123ms rychlejší než jeho předpoklad. Celková mechanická chyba operace zapnutí, činí v průměru na jednu fázi 0,302ms.

Vypínač B:

Mechanický provozní čas vypínače B je v průměru o 0,945ms rychlejší než jeho předpoklad. Avšak celková mechanická chyba operace zapnutí, činí v průměru na jednu fázi 0,977ms.

Přesto, že skutečný čas mechanického provozního času vypínače B se jeví jako rychlejší, než mechanický provozní čas vypínače A, jeho celková mechanická chyba je trojnásobná. Na základě teplotní kompenzace, jsou kompenzovány mechanické časy vypínače A, kdy skutečně oproti vypínači B, bez této kompenzace jsou mechanické časy bližší předpokladu, tudíž je mechanická chyba operace menší. Konkrétně mechanismus vypínače A je blíže ideálním nulovým mechanickým chybám o 0,675ms, oproti vypínači B, jehož řízení není teplotně kompenzováno.

4.3 Vypnutí

Celkový princip vypnutí, včetně grafického výstupu ze Switchsync je pro operaci vypnutí stejný jako v kapitole 3.3. Platí i stejné pravidlo, že pevně přednastavena volba předstihové fáze je fáze L1.

4.3.1 Vypnutí – základní parametry

V zařízení Switchsync byly dostupné pouze čtyři operace vypnutí, kdy venkovní teplota překročila hodnotu +20 °C a mohlo tak dojít k teplotní kompenzaci. Parametry těchto čtyř operací jsou v Tab. 28.

Tab. 28 - Parametry vypnutí s využitím kompenzační křivky

Datum	A-bez kompenzace		22.08.2019 13:35			22.08.2019 13:42			25.08.2019 11:08			01.09.2019 8:06		
Open operation		-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Electrical target error	Elektrická chyba operace	ms	-0,3	-0,28	-0,04	0,04	-0,2	0,08	0	-0,21	0,03	0,06	0,11	0,13
Electrical operating time	Elektrický provozní čas	ms	24,35	22,82	22,96	24,69	22,9	23,8	24,65	22,89	23,1	24,71	23,21	23,13
Predicted electrical operating time	Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	24,65	23,1	23	24,65	23,1	23	24,65	23,1	23	24,65	23,1	23
Arcing time	Čas hoření oblouku	ms	8,75	7,32	7,56	9,9	7,4	7,68	9,5	7,39	7,63	9,9	7,71	7,73
Target arcing time	Cílový čas hoření oblouku	ms	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6
Mechanical target error	Mechanická chyba operace	ms	0,25	0,21	0,22	0,19	0,48	0,12	0,2	0,46	0,34	0,22	0,18	0,29
Mechanical operating time	Mechanický provozní čas	ms	15,85	15,71	15,62	15,79	15,98	15,52	15,8	15,96	15,74	15,82	15,68	15,69
Predicted mechanical operating time	Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	15,6	15,5	15,4	15,6	15,5	15,4	15,6	15,5	15,4	15,6	15,5	15,4
Initial mechanical delay time	Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	15,64	13,88	14,72	15,59	14,15	14,63	15,6	14,17	14,84	15,61	13,8	14,8
Mechanical moving time	Mechanický čas pohybu	ms	17,29	17,13	16,49	17,44	17,13	16,36	16,92	16,74	16,45	17,16	17,53	16,22
Controller delay time	Časové zpoždění	ms	44,05	44,05	44,05	45,81	45,81	45,81	45,74	45,74	45,74	58,09	58,09	58,09
Idle time	Doba nečinnosti	h	0,08	0,08	0,08	0,01	0,01	0,01	11,13	11,13	11,13	10,43	10,43	10,43
Temperature	Teplota	°C	21,56	0	0	21,56	0	0	26,73	0	0	25,52	0	0
DC control voltage	DC řídicí napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Operation count	Počet operací		155	154	154	156	155	155	157	156	156	160	159	159
Interrupter wear			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cumulated interrupter wear	Kumulované opotřebení přerušovače		136	136	136	137	137	137	138	138	138	141	141	141

Tab. 29 - Parametry vypnutí bez využití kompenzační křivky

Datum	A-bez kompenzace		29.08.2019 6:21			31.08.2019 7:04			02.09.2019 6:02			03.09.2019 15:13		
Open operation		-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Electrical target error	Elektrická chyba operace	ms	0	-0,25	-0,12	0,12	0,13	-0,11	0,01	-0,01	0,2	-0,2	-0,33	0,15
Electrical operating time	Elektrický provozní čas	ms	24,65	22,85	22,88	24,77	23,23	22,89	24,66	23,9	23,2	24,45	22,77	23,15
Predicted electrical operating time	Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	24,65	23,1	23	24,65	23,1	23	24,65	23,1	23	24,65	23,1	23
Arcing time	Čas hoření oblouku	ms	9,5	7,35	7,48	9,17	7,73	7,49	9,6	7,59	7,8	8,85	7,27	7,75
Target arcing time	Cílový čas hoření oblouku	ms	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6	9,5	7,6	7,6
Mechanical target error	Mechanická chyba operace	ms	0,17	0,25	0,15	0,23	0,29	0,32	0,23	0,11	0,32	0,18	0,1	0,21
Mechanical operating time	Mechanický provozní čas	ms	15,77	15,75	15,55	15,83	15,79	15,72	15,83	15,61	15,72	15,78	15,6	15,61
Predicted mechanical operating time	Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	15,6	15,5	15,4	15,6	15,5	15,4	15,6	15,5	15,4	15,6	15,5	15,4
Initial mechanical delay time	Počáteční mechanický čas zpoždění	ms	15,56	13,92	14,66	15,63	14,1	14,84	15,63	13,79	14,83	15,57	13,78	14,73
Mechanical moving time	Mechanický čas pohybu	ms	17,21	17,13	16,35	17,17	16,64	16,19	17,18	17,1	16,42	17,47	17,4	16,27
Controller delay time	Časové zpoždění	ms	53,68	53,68	53,68	42,85	42,85	42,85	57,54	57,54	57,54	47,66	47,66	47,66
Idle time	Doba nečinnosti	h	5,64	5,64	5,64	5,21	5,21	5,21	6,44	6,44	6,44	0,01	0,01	0,01
Temperature	Teplota	°C	19,57	0	0	18,1	0	0	17,76	0	0	19,5	0	0
DC control voltage	DC řídicí napětí	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
Operation count	Počet operací		158	157	157	159	158	158	161	160	160	162	161	161
Interrupter wear			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cumulated interrupter wear	Kumulované opotřebení přerušovače		139	139	139	140	140	140	142	142	142	143	143	143

V Tab. 29 jsou uvedeny parametry, kdy teplota se blíží hranici +20 °C, a to z důvodu, aby porovnávající parametry měly vyšší váhu. Jde konkrétně o teploty 19,57 °C, 18,1 °C, 17,76 °C a 19,5 °C. V rámci těchto teplot kompenzační křivka nabývá nulové kompenzační hodnoty.

4.3.2 Vypnutí – porovnání základních parametrů

Tab. 30 - Porovnání základních parametrů s teplotou okolí nad a pod +20 °C při operaci vypnutí

Operace vypnutí		Teplota okolí nad +20°C			Teplota okolí pod +20°C		
		Celkem	Průměr na sepnutí	Průměr na fázi	Celkem	Průměr na sepnutí	Průměr na fázi
Předpokládaný elektrický provozní čas	ms	283,000	70,750	23,583	283,000	70,750	23,583
Elektrický provozní čas	ms	283,210	70,803	23,601	283,400	70,850	23,617
Rozdíl předpoklad / skutečnost	ms	0,210	0,052	0,017	0,400	0,100	0,033
Elektrická chyba operace	ms	1,480	0,370	0,123	1,630	0,408	0,136
Předpokládaný mechanický provozní čas	ms	186,000	46,500	15,500	186,000	46,500	15,500
Mechanický provozní čas	ms	189,160	47,290	15,763	188,560	47,140	15,713
Rozdíl předpoklad / skutečnost	ms	3,160	0,790	0,263	2,560	0,640	0,213
Mechanická chyba operace	ms	3,160	0,790	0,263	2,560	0,640	0,213
Mechanický čas pohybu	ms	202,860	50,715	16,905	188,560	47,140	15,713
Hoření oblouku - předpoklad	ms	98,800	24,700	8,233	98,800	24,700	8,233
Hoření oblouku - skutečnost	ms	98,470	24,618	8,206	97,580	24,395	8,132
hoření oblouku - rozdíl	ms	-0,330	-0,082	-0,027	-1,220	-0,305	-0,102

V Tab. 30 jsou uvedeny průměry hodnot s a bez využití hodnocení kompenzační křivky k operaci zapnutí. Ani jeden z hodnocených parametrů, nikterak nevybočoval z řady, proto vnímám tyto hodnoty stejně korektní, jako hodnoty u operace vypnutí.

4.3.2.1 Elektrické parametry

U parametrů, s teplotami přesahujícími hodnotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, došlo v průměru na fázi o přesah času $0,017\text{ms}$, oproti předpokládanému času operace. Průměrná elektrická chyba operace na jedno vypnutí činí $0,370\text{ms}$, což je $0,123\text{ms}$ na jednu fázi.

U parametrů vypnutí, kde venkovní teploty nabývají hodnot pod $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, došlo v průměru na fázi o přesah času $0,033\text{ms}$, oproti předpokládanému času operace. Průměrná elektrická chyba operace na jedno vypnutí činí $0,408\text{ms}$, což je $0,136\text{ms}$ na jednu fázi.

Elektrická chyba operace, určuje v podstatě nepřesnost operací elektrických, kdy Switchsync směřuje k hodnotě nula. Elektrická chyba je tedy rozdíl od nuly, po kladnou či zápornou odchylku sepnutí. U využití kompenzační teplotní křivky je tato chyba průměrně na fázi o $0,013\text{ms}$ přesnější, než je tomu u vypínání s venkovními teplotami pod $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíl je v tomto případě zanedbatelný.

Předpokládané elektrické provozní časy dle Tab. 28 a Tab. 29 jsou konstantní, a to u L1 – $24,65\text{ms}$, L2 – $23,1\text{ms}$ a L3 – 23ms . Z těchto údajů se domnívám, že kompenzační křivka u elektrických parametrů, nehraje roli a že u operace vypnutí, není kompenzační křivka využita.

4.3.2.2 Mechanické parametry

Mechanické parametry a jeho předpoklady jsou také shodné, jak u teplot nad $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tak pod $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, stejně jako u parametrů elektrických. Z toho plyne, že kompenzační křivka u operace vypnutí opravdu není využita. I přes to, porovnám sepnutí nad teplotou $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pod ní.

Dle porovnání výstupů, kdy 4 výstupy překročily tuto teplotní hranici a 4 ne, můžeme říci, že mechanický provozní čas v porovnání s předpokládaným, byl u teplot nad $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ průměrně horší o $0,05\text{ms}$ na jednu fázi. Zajímavostí však je, že mechanický čas pohybu, byl o $1,192\text{ms}$ v průměru na jednu fázi horší, než u teplot pod $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3.2.3 Hoření oblouku

Při porovnání délky hoření oblouku, u teplot nad $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, průměrně nabývá délky $8,206\text{ms}$. U parametrů vypnutí pod touto teplotní hranicí, je průměrná délka oblouku $8,132\text{ms}$. Rozdíl těchto časů je tedy $0,074\text{ms}$.

4.3.3 Vypnutí – odvozené parametry

Na základě parametrů operace vypnutí ze Switchsync, jsou zde dopočteny další odvozené parametry, které je možné také analyzovat a porovnávat. Avšak ze zjištění elektrických a mechanických parametrů, není využita teplotní kompenzační křivka, a proto jsou tyto parametry vhodné pouze k vyhodnocení samotného vypnutí, nikoliv rozdílu mezi vypínáním s a bez teplotní kompenzační křivky.

Tab. 31 - Odvozené parametry operace vypnutí nad +20 °C

Datum		18.03.2020 6:22			22.03.2020 5:52			23.03.2020 5:25			25.03.2020 6:21		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	39,05	44,05	44,05	40,81	45,81	45,81	40,74	45,74	45,74	37,85	42,85	42,85
Rozpojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	54,69	57,93	58,77	56,4	59,96	60,44	56,34	59,91	60,58	53,48	56,95	57,69
Připojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	71,98	75,06	75,26	73,84	77,09	76,80	73,26	76,65	77,03	70,65	73,59	73,88
Rozdíl mezi odpojením NO a přerušením průchodu proudu	ms	8,58	8,19	8,25	8,34	8,38	7,19	7,87	8,02	8,19	8,03	7,51	8,14
Počátek přerušení proudu	ms	63,40	66,87	67,01	65,50	68,71	69,61	65,39	68,63	68,84	62,62	66,08	65,74
Rozdíl mezi přerušením proudu L1 a L2/L3	ms	3,61	-	-	3,21	-	-	3,24	-	-	3,46	-	-

Tab. 32 - Odvozené parametry operace vypnutí pod +20 °C

Datum		24.03.2020 6:15			26.03.2020 8:23			27.03.2020 6:14			28.03.2020 6:36		
Close operation	-	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Skutečné časové zpoždění	ms	48,68	53,68	53,68	53,09	58,09	58,09	52,54	57,54	57,54	42,66	47,66	47,66
Rozpojení pomocného pracovního kontaktu NO	ms	64,24	67,6	68,34	68,7	71,89	72,89	68,17	71,33	72,37	58,23	61,44	62,39
Připojení pomocného klidového kontaktu NC	ms	81,45	84,73	84,69	85,86	89,42	89,11	85,35	88,43	88,79	75,70	78,84	78,66
Rozdíl mezi odpojením NO a přerušením průchodu proudu	ms	8,12	8,20	8,13	8,06	8,12	7,89	8,15	6,99	8,05	8,59	8,41	7,85
Počátek přerušení proudu	ms	73,33	76,53	76,56	77,80	81,30	81,22	77,20	81,44	80,74	67,11	70,43	70,81
Rozdíl mezi přerušením proudu L1 a L2/L3	ms	3,20	-	-	3,42	-	-	3,54	-	-	3,70	-	-

5 DOPORUČENÍ A VÝSTUPY STUDIJNÍ SKUPINY A3 SIGRE

Při uvádění do provozu a při provozování zařízení pro řízené spínání jsem vycházel z materiálů CIGRE – studijní skupiny A3 Transmission & Distribution Equipment. Řízené spínání (Controlled switching systems CCSs) je používáno v přenosových i distribučních sítích ve světě od 90. let minulého století (1990). Tato zařízení pro řízené spínání chrání nejen vypínač, ale i zařízení, která jsou spínána. Omezují opalování kontaktů komor vypínače, snižují zotavené napětí, omezují zapínací proud a monitorují vypínač v průběhu jeho životního cyklu.

Zařízení pro řízené spínání se používá pro spínání kondenzátorových baterií, kompenzačních tlumivek, transformátorů a přenosových vedení. V přenosové soustavě ČR používáme tato zařízení zejména pro spínání kompenzačních tlumivek v terciárech transformátorů na úrovni 10,5kV a 35kV a pro spínání tlumivek na úrovni 400kV.

Pro získávání zkušeností skupiny CIGRE jsem použil publikace „Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems“ [6] a CIGRE Green Books „Switching Equipment“ SC A3 [7]. V obou publikacích je v samostatných kapitolách popisována problematika řízeného spínání (Controlled Switching), a to jak teorie procesu spínání, tak i zkušenosti z provozu těchto zařízení IED (Intelligent Electronic Device – inteligentní elektronické zařízení).

V Green Book Switching Equipment, pan Hiroki Ito (Japonsko) definuje pojem řízeného spínání (controlled switching) pro spínání čili pro zapnutí a vypnutí po jednotlivých pólech vypínače. Nejedná se o synchronizované spínání (synchronized switching), které má zcela jiný princip zapínání. Jeho doporučením je použití adaptivní kompenzace (Adaptive Compensation), která reaguje na změny teploty, jak v komoře vypínače, tak i v pohonu vypínače. Pro teplotní kompenzaci používá Switchsync korekční křivku dle provozní teploty okolí vypínače. Mimo pana Hiroki Ito (Japonsko), doporučuje použití teplotní kompenzace také přenosová soustava v Indii, která ji ve svých podmínkách hojně využívá.

Proces vypínání vypínače je spojen se vznikem zotaveného napětí, a na tuto skutečnost se zaměřuje ve svých aplikacích Hydro-Quebec Kanada. Napětí na vypínači měří pomocí kapacitních senzorů instalovaných na průchodkách transformátoru a na vypínači. Tím je do Switchsync přivedena reálná hodnota napětí při vypnutí a přerušení oblouku a následném zotaveném napětí.

Velkou výhodou IED (zařízení pro řízené spínání) je využití monitorování procesů zapnutí a vypnutí vypínače, které umožňuje sledovat mechanické a elektrické vlastnosti vypínače v průběhu doby života neboli provozu (Life Cycle Management – Řízení životního cyklu). Dle těchto informací pak lze lépe a efektivněji plánovat údržbu, případně prodloužit lhůty údržby. (A. Mercier (Kanada) a M. Waldron (Anglie)). Tyto mechanické a elektrické vlastnosti a parametry jsou sledovány a vyhodnocovány z části také v této diplomové práci.

Získávání dalších zkušeností v této oblasti je podporována společností CIGRE ve spolupráci s vysokými školami a firmami zabývajícími se provozem a údržbou přenosových soustav. Knihy CIGRE Green Books jsou určeny převážně pro tuto činnost.

ZÁVĚR

Optimalizace řízeného spínání je tématem velmi rozsáhlým a stále velmi technicky zajímavým. Jsme stále ve fázi, kdy se v ČR učíme a zjišťujeme jakým způsobem je možno dále využít vyhodnocení a parametry optimalizace řízeného spínání v přenosové soustavě převážně pomocí Switchsync PWC600. Respektive jsou zkoumány a vyhodnocovány výstupy tohoto zařízení. Zprovozněním tohoto zařízení, pravidelné údržbě, kontrolám, funkčnosti a vyhodnocování výstupů jednotlivých parametrů se věnují celé týmy specialistů údržby silového zařízení, specialistů z technické politiky, specialistů údržby sekundární techniky a ochran, včetně spolupráce provozních činností a dalších, kdy cílem všech je bezproblémový chod zařízení, nastavení, povědomí a předpoklad jeho dalšího chování.[4]

Hlavní podstatou tohoto zařízení a optimalizace řízeného spínání je v první řadě minimalizovat zatěžování vypínače (zapínacích proudů, zotaveného napětí) na takovou míru, abychom minimalizovali pravděpodobnost zbytečně velkého opotřebení a elektrického namáhání vypínače, tak jak tomu bylo dříve. Obecně jde o minimalizaci následků přechodových jevů. Výsledkem jsou delší servisní intervaly vypínače, větší životnost a s tím i spojená úspora nákladů na provoz tohoto zařízení. Právě i z hlediska montáže zařízení k optimalizaci řízeného spínání se důsledkem zotaveného napětí začaly používat vypínače se jmenovitou hodnotou napětí 72,5kV v terciárech transformátorů o napěťové hladině 10,5kV, což je opět krok ke snížení elektrického namáhání vypínače a jeho větší životnosti. [4]

V této diplomové práci je popsána hlavní problematika optimalizace řízeného spínání na základě kompenzace parametrů a adaptivní korekce jak elektrických, tak mechanických výstupů operací vypnutí a zapnutí. Jsou zde rozebrány a vysvětleny jednotlivé parametry, jakožto výstupy ze zařízení Switchsync a následně dopočítány další převážně mechanické parametry jednotlivých operací.

Zajímavým zjištěním je, že při operaci zapnutí, kdy není pevně nastavená předstihová fáze L1, je stejně operace zapnutí touto fází řízena. Postup zařízení je dvojitý. Pokud dochází jako první k sepnutí fází L1-L2, nebo L3-L1, platí pro tyto dvě fáze nastavené časové zpoždění (které Switchsync udává pro všechny 3 fáze stejné), následně čas třetí spínané fáze je zpožděn o 90°, což je 5ms, oproti předpokladu a fázím L1-L2 případně L3-L1. Pokud jsou první zapínané fáze L2 a L3, uvedené časové zpoždění platí pouze pro fázi L1, která bude spínat až poslední, i když Switchsync uvádí stejný čas pro všechny tři fáze. Zde je potřeba z uvedeného časového zpoždění odečíst 90° (5ms), abychom zjistili skutečné časové zpoždění (neboli čas, kdy Switchsync vyše impuls k zapnutí na jednotlivé fáze) fází L2 a L3.

Na základě bakalářské práce, která předcházela této diplomové práci, bylo doplněno snímání venkovní teploty okolí a vložena teplotní kompenzační křivka do Switchsync na jednom zařízení, pro jeden vypínač. Dále došlo k porovnání operací zapnutí s využitím korekce na základě venkovní teploty okolí, kdy kompenzační teplotní křivka již hrála svou roli a porovnáním kdy svou roli nehrála (korekce nabývala nulových časů v rozmezí teplot -10 °C a +20 °C).

Zde z vybraných vzorků a jejich parametrů vyplývá, že při využití teplotní kompenzace dochází k mírnému zhoršení elektrické chyby. Ta činí průměrně 0,102ms na fázi oproti předpokladu. U operace zapnutí bez využití kompenzační křivky je rozdíl mezi skutečností a předpokladem pouze -0,02ms.

Přesným opakem je však chyba mechanická, na kterou má mít teplotní kompenzace větší vliv. Mechanická chyba bez využití kompenzační křivky činí průměrně 0,542ms a s využitím teplotní kompenzační křivky 0,302ms na jednu fázi. Rozdíl mechanické chyby je téměř 1,8násobek. Avšak toto tvrzení vychází pouze z dostupných operací zapnutí, kdy bylo porovnáno 5 operací s využitím kompenzační křivky a 5 operací bez jejího využití na stejném vypínači. Pro potvrzení této skutečnosti je potřeba vypínač a data operací zapnutí zkoumat pečlivě a dlouhodobě.

Na základě porovnání parametrů operace zapnutí dvou vypínačů se stejnými štítkovými parametry, spínající stejné zařízení na stejné elektrické stanici, vypínač A (s využitím teplotní kompenzace) jeví taktéž horší elektrické chyby operace oproti vypínači B (bez teplotní kompenzace). Vypínač A–0,145ms, vypínač B–0,097ms.

Mechanická chyba operace vypínače A, činí průměrně na jednu fázi 0,302ms. Vypínače B 0,977ms. Mechanická chyba vypínače B bez teplotní kompenzace je více než 3násobná oproti vypínači A, který využívá kompenzace na základě teplotní kompenzační křivky.

U operace vypnutí teplotní kompenzační křivka nemá žádný vliv, neboť možnost využití tohoto parametru nebyla v zařízení Switchsync nastavena.

K minimalizaci mechanické chyby operací zapnutí se z vyhodnocených parametrů jeví, že teplotní kompenzace má svůj smysl. Výstupy a doporučení společnosti CIGRE, pana Hiroki Ita a instalace tohoto zařízení v přenosové soustavě Indie, má jistě také svůj smysl. Otázkou však zůstává, zda nastavená teplotní kompenzační křivka je ideální, vzhledem k environmentálním vlivům ČR, kdy limitní teploty stoupají spíše vzhůru a již nyní atakují vrchní limity. K potvrzení účinnosti instalované teplotní kompenzace a kompenzační křivky a závěrům uvedených výše, je potřeba porovnat a vyhodnotit více vzorků, pro větší objektivitu a případné potvrzení skutečnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] „Ing. Otto HAVELKA CSC., a kolektiv. Elektrické přístroje. Praha: SNTL, 1985. DT 621.31(075.8).“
- [2] „ABB. *Product manual HPL72.5-300B1: 1HSB449954-1En (Circuit - breaker unit)*. Sweden: ABB AB, 2010“
- [3] „MORAVEC, Jan. Elektrický oblouk. [Http://oenergetice.cz](http://oenergetice.cz) [online]. 2017, 8.4.2017 [cit. 2017-12-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk/>“
- [4] REDER, Zdeněk. *Optimalizované spínání*. VŠB – TUO, 2018. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Ing. Petr Kačor, Ph.D.
- [5] „ABB. Switchsync PWC600: User manual. Revision: A, Product version: 1.0. Sweden: ABB, 2015. ISBN Document ID: 1MRK 511 346-UEN.“
- [6] „SMEETS, R., LOU VAN DER SLUIS, KAPETANOVIC, M., PELO, D.F., JANSSEN, A.: *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*; Wiley, 2015, ISBN 978-1-118-3815-9“
- [7] „CIGRE GREEN BOOKS – SC A3 HIROKI, ITO editor: *Switching Equipment*; Springer Nature Switzerland AG, 2019, ISBN 978-3-319-72537-6“